

Département de géomatique appliquée

Faculté des lettres et sciences humaines

Université de Sherbrooke

Compréhension des températures de brillance en bande L dans les milieux forestiers multicouches dans une perspective d'amélioration de l'estimation de l'humidité du sol

Benchallal Amirouche

Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph. D.) en
télédétection avec un cheminement en physique de télédétection

Directeurs de recherche: Profs. Ramata Magagi et Kalifa Goïta

Octobre 2019

©Amirouche Benchallal, 2019

Résumé

L'humidité du sol est un maillon essentiel des cycles d'eau et d'énergie. Elle contrôle les processus d'évaporation du sol et de transpiration du couvert végétal. Dès lors, l'information de sa variabilité spatiale et temporelle est d'une importance capitale pour plusieurs disciplines scientifiques. Sur des couverts forestiers, le processus d'estimation de l'humidité du sol reste une problématique de recherche d'actualité. Ce processus est entravé par plusieurs difficultés de modélisation liées au milieu observé, telles que la densité du couvert végétal et son contenu en eau et la présence de couches-écrans du sol minéral comme la litière, l'humus et le sous-bois. Les paramètres d'observation du capteur, telle que la fréquence, introduisent également des difficultés de modélisation.

La finalité de nos travaux de recherche est la compréhension de l'interaction des températures de brillance en bande L avec les couches de milieux forestiers afin d'identifier le potentiel de l'estimation de l'humidité du sol. Cette interaction sera étudiée en utilisant un modèle de transfert radiatif de diffusion d'ordre 1 développé par Kurum *et al.* (2011). Comparé au modèle semi-empirique $\tau - \omega$ d'ordre 0, le modèle de Kurum *et al.* (2011) prend en considération les diffusions importantes se produisant dans un milieu forestier. De plus, il modélise physiquement les propriétés d'émission et d'extinction des éléments du couvert végétal forestier (arbres et sous-bois), ainsi que l'interaction de ce dernier avec les couches du sol forestier (sol minéral, litière, humus).

Pour atteindre cet objectif, des données expérimentales ont été acquises sur quatre sites forestiers de feuillus. Ces sites présentent différentes caractéristiques de couvert végétal forestier et de sol. Les données expérimentales comprennent des données caractérisant le couvert végétal (forêt ou sous-bois), telles que la hauteur du couvert, sa densité, les dimensions et les constantes diélectriques des éléments le constituant. Pour ce qui est des sols forestiers, des données sur le contenu en eau et l'épaisseur de la couche de litière et/ou d'humus et l'humidité du sol minéral ont été acquises. Deux des sites (SF-MSA, SF-SIRENE) sont situés près du campus principal de l'Université de Sherbrooke, Québec, Canada. Les deux autres sites (F2 et F3) de la campagne SMAPVEX12 sont localisés au sud-ouest de l'aéroport Southport à Winnipeg, Manitoba, Canada. Le sol forestier des sites

d'étude est composé de deux couches qui sont la couche du sol minéral sur laquelle est superposée une couche d'humus et de litière, dans le cas des sites forestiers de la campagne SMAPVEX12, et d'une fine couche de litière dans le cas des sites SF-MSA et SF-SIRENE. Le sous-bois des sites de la campagne SMAPVEX12 et du site SF-SIRENE est majoritairement composé de petits arbres et d'arbustes, alors que celui du site SF-MSA est composé d'une couche d'arbuste de frêne. Des données de température de brillance en bande L ont été acquises selon différentes configurations d'observation dans le but de garantir une complémentarité des données et une caractérisation séparée des contributions des couches constituant ces milieux forestiers.

Deux objectifs majeurs ont été ciblés. Premièrement, les données acquises ont été utilisées pour faire l'évaluation du modèle de Kurum *et al.* (2011) sur les sites forestiers étudiés. Dans le processus d'évaluation, la couche de sous-bois a été prise en compte et la couche de litière et/ou d'humus a été intégrée à travers un modèle cohérent de réflectivité trois-couches des sols des sites forestiers d'étude. Deuxièmement, d'une part, les simulations de la solution d'ordre 0 (solution K0) du modèle de Kurum *et al.* (2011) sont comparées à celles du modèle semi-empirique $\tau - \omega$ d'ordre 0. Cette comparaison est faite dans le but de montrer le sens physique des paramètres τ et ω du modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0. Un lien est fait avec les simulations de la solution d'ordre 1 (solution K1) du modèle de Kurum *et al.* (2011). D'autre part, les performances de la solution K1 et du modèle $\tau - \omega$ seront comparées, en termes d'erreurs de simulations, par rapport aux températures de brillances acquises sur les sites forestiers étudiés.

La comparaison des simulations du modèle $\tau - \omega$ avec celles de la solution K1 a montré que la solution K1 fournit les meilleurs résultats de simulations. Pour les trois sites forestiers, la solution K1, pour les deux polarisations, surestime les mesures de températures de brillance. Les erreurs maximales de l'évaluation de la solution K1 ne dépassent pas 4,5 K. La comparaison des simulations de la solution K0 et K1 permettent d'expliquer le sens physique de l'albédo utilisé dans le modèle $\tau - \omega$. Les calculs théoriques de l'albédo effectif de la solution K1 montrent des valeurs comprises dans l'intervalle [0,050 0,085] en polarisation H et dans l'intervalle [0,070 0,090] en polarisation V. Dans le cas de la mission SMAP, la valeur de 0,05 est assignée à l'albédo effectif pour une large

gamme de couverts forestiers indépendamment de la polarisation. Les valeurs d'albédo effectif utilisées dans la mission SMOS ([0,06 0,08]) sont comprises dans l'intervalle des valeurs calculées théoriquement par la solution K1. Nos résultats montrent que la valeur d'albédo effectif de 0,05 injecté au modèle $\tau - \omega$ génère des températures de brillance qui surestiment les simulations théoriques, particulièrement en polarisation H. Elles surestiment davantage les mesures des radiomètres sur les sites SF-SIRENE, F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12. Sur le site SF-MSA, cette valeur d'albédo effectif simule des températures de brillance qui sous-estiment les mesures du radiomètre. Ces résultats indiquent que cette valeur de 0,05 d'albédo effectif est faible pour le cas des sites SF-SIRENE et les sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12. Par contre pour le site SF-MSA, cette valeur est élevée. Nos résultats montrent aussi que la valeur du paramètre effectif de rugosité h' , utilisée dans la mission SMAP, est inférieure aux valeurs estimées par les mesures de TB acquises sur les sols des sites forestiers SF-MSA et SF-SIRENE.

Avec les mesures *in situ* acquises sous la canopée forestière du site SF-MSA et les résultats de simulations, le comportement radiatif des couches de litière et de sous-bois a bien été quantifié grâce à l'enlèvement successif de ces deux couches dans l'empreinte au sol du radiomètre. Le sous-bois, constitué d'arbustes de frêne, composé majoritairement de feuilles, est une très faible source d'émission et d'extinction. Le même constat est fait pour le sous-bois présent sur les sites de la campagne SMAPVEX12 et celui de la campagne SF-SIRENE. La couche de litière en conditions humides est une source d'émission, même avec des épaisseurs faibles (~ 1 cm). Sa contribution est plus importante en polarisation H qu'en polarisation V. Les mesures radiométriques prises au-dessus de la canopée forestière du site SF-SIRENE et les simulations ont démontré que dans les conditions denses de ce site forestier, les températures de brillance observées ou simulées sont insensibles à l'enlèvement de la couche de litière, et donc par ricochet seraient insensibles aux variations de l'HS. Il en ressort que selon la densité du couvert végétal et les conditions d'observation, le signal émanant des basses couches (sol minéral, litière, et sous-bois) peut être drastiquement atténué. Par conséquent, le lien entre l'humidité du sol et le signal acquis par le radiomètre n'est plus exploitable pour l'estimation de l'humidité du sol sur des couverts forestiers denses.

Mots clés: températures de brillance, transfert radiatif, micro-ondes passives, bande L, milieux forestiers, sous-bois, litière, paramètres radiatifs, humidité du sol, albédo effectif, SMAP, SMOS.

Abstract

Soil moisture is a key parameter in water and energy cycles. It controls the processes of soil evaporation and the plant cover transpiration. Therefore, the information of its spatial and temporal variability is of paramount importance for several scientific disciplines. Over forest covers, the process of estimating soil moisture remains a topical research issue. This process is hampered by several modeling difficulties related to the observed environment, such as the density of the vegetation cover and its water content and the presence of layers such as litter, humus, and understory screening the mineral soil. The observation parameters of the sensor, such as the frequency, also introduce modeling difficulties.

The purpose of our research is to understand the interaction of L-band brightness temperatures with forested sites layers in order to identify the potential of soil moisture retrieval. This interaction has been studied using a first-order radiative transfer model developed by Kurum *et al.* (2011). Compared to the 0 order semi-empirical $\tau - \omega$ model, the model from Kurum *et al.* (2011) takes into account the main scattering mechanisms occurring in a forest environment. In addition, it physically models the emission and extinction properties of forest cover elements (trees and undergrowth), as well as its interaction with forest floor layers (mineral soil, litter, humus).

To achieve this objective, experimental data sets were acquired at four deciduous forest sites. These sites show different forest cover and floor characteristics. The experimental data include data characterizing the vegetation cover (forest or understory), such as canopy height, density, dimensions and dielectric constants of canopy elements. Concerning the floors of the forested sites, data on the water content of litter and /or humus layer and its thickness, and mineral soil moisture content were acquired. Two of the sites (SF-MSA, SF-SIRENE) are located near the main campus of Université de Sherbrooke, Quebec, Canada. The other two sites (F2 and F3) from the SMAPVEX12 campaign are located southwest of Southport Airport in Winnipeg, Manitoba, Canada. The forest floor of the study sites is composed of two layers which are the layer of mineral soil on which is superimposed a layer of humus and litter, in the case of forest sites of the SMAPVEX12 campaign, and a thin layer in the case of the SF-MSA and SF-SIRENE sites. The understory of the SMAPVEX12 and SF-SIRENE sites is mostly composed of small trees and shrubs, while

that of SF-MSA site is composed of a layer of ash shrubs. L-band brightness temperature data were acquired from different observation configurations in order to ensure complementarity of data and separate the L-band contributions of the layers constituting these forest environments.

Two major goals have been targeted. First, the acquired data were used to evaluate the model from Kurum *et al.* (2011) with the data acquired on the different forest sites studied. In the evaluation process, the understory layer was taken into account and the litter and/or humus layer was integrated through a coherent three-layer reflectivity model of the floors of the forested sites. Secondly, on one hand, the simulations of the 0 order solution (K0 solution) of Kurum *et al.* (2011) model are compared with those of the 0 order semi-empirical $\tau - \omega$ model. This comparison is made in order to show the physical meaning of the parameters τ and ω of the 0 order $\tau - \omega$ model. A link is made with the simulations of the first-order solution (K1 solution) of Kurum *et al.* (2011). On the other hand, the performance of the K1 solution and the $\tau - \omega$ model are compared, in terms of simulation errors with respect to the brightness temperatures acquired over the forest sites studied.

The comparison of the simulations of the $\tau - \omega$ model with the K1 solution has shown that the K1 solution provides the best simulation results. For the three forest sites, the K1 solution, for both polarizations, overestimates the brightness temperature measurements. The maximum errors of the K1 solution do not exceed 4.5 K. The simulations of the K0 solution make it possible to explain the physical meaning of the albedo used in the $\tau - \omega$ model compared to the one calculated theoretically by the K1 solution. Theoretical calculations of the effective albedo show that its values are in the range [0,050 0,085] in H polarization and in the interval [0,070 0,090] in V polarization. In the case of the SMAP mission, the value of 0,05 is assigned to the effective albedo for a wide range of forest covers regardless of polarization. The effective albedo values used in the SMOS mission ([0,06 0,08]) are in the range of values calculated theoretically by the K1 solution. Our results show that the value 0,05 of the effective albedo injected to the $\tau - \omega$ model generates brightness temperatures that overestimate the theoretical simulations and the radiometers measurements on SF-SIRENE site, and F2 and F3 sites of the SMAPVEX12 campaign. On the SF-MSA site, this effective albedo value generate brightness temperatures that

underestimate radiometer measurements. These results indicate that the value 0,05 of the effective albedo is small for the SF-SIRENE site, and the F2 and F3 sites of the SMAPVEX12 campaign. However, for the SF-MSA site, this value is large. Our results also show that the value of the effective roughness parameter h' , used in the SMAP mission, is lower than the values estimated by the brightness temperatures acquired over the forest floors of the study sites.

With the *in situ* measurements taken below SF-MSA forest canopy and the results of simulations, the radiative behavior of litter and understory layers has been quantified thanks to the successive removal of these two layers in the radiometer footprint. The understory, mainly composed of leaves, is a very weak source of emission and extinction. The same observation is made for the understory present on the forest sites of SMAPVEX12 campaign that of the SF-SIRENE campaign. The litter layer in wet conditions is a source of emission, even with low thicknesses (~ 1 cm). Its contribution is greater in H polarization than in V polarization. The radiometric measurements taken above SF-SIRENE forest canopy site and the simulations have shown that under the dense conditions of this forest site, the observed brightness or simulated temperatures are insensitive to the removal of the litter layer. Therefore, they would be insensitive to variations of soil moisture. It emerges that depending on the density of the vegetation cover and the observation conditions, the signal emanating from the lower layers (mineral soil, litter, and understory) can be strongly attenuated. As a result, the link between soil moisture and the radiometer signal is no longer exploitable for retrieving soil moisture over dense forest canopies.

Keywords: brightness temperatures, passive microwaves, radiative transfer, L-band, forest environments, understory, litter, radiative parameters, soil moisture, effective albedo, SMAP, SMOS.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1. INTRODUCTION	1
1.1. MISE EN CONTEXTE GÉNÉRAL	1
1.2. PROBLÉMATIQUE.....	3
1.3. OBJECTIFS	6
1.4. HYPOTHÈSES	7
CHAPITRE 2. CADRE THÉORIQUE	8
2.1. MODÉLISATION DE L'ÉMISSION MICRO-ONDE DE LA VÉGÉTATION.....	8
2.1.1. Le modèle semi-empirique $\tau - \omega$	9
2.1.2. Généralités sur les modèles de transfert radiatif basés sur l'approche discrète	13
2.1.3. Exemple du modèle de Kurum <i>et al.</i> (2011) basé sur l'approche discrète	15
2.1.4. Caractérisation de l'émissivité des composantes d'une canopée forestière....	18
2.1.5. Caractérisation de l'effet du sous-bois.....	23
2.2. MODÉLISATION EN MICRO-ONDES PASSIVES DE SOLS FORESTIERS.....	25
2.2.1. Impact des couches organiques sur l'émission du sol : litière et humus	25
2.2.2. Modélisation de l'émission d'un sol forestier monocouche	28
2.2.3. Modélisation de l'émission d'un sol forestier multicouches	30
2.2.4. Caractérisation diélectrique de la couche du sol minéral.....	32
2.2.5. Caractérisation diélectrique de la couche organique de litière	34
2.2.6. Caractérisation diélectrique de la couche organique d'humus	36
CHAPITRE 3. SITES D'ÉTUDE ET DONNÉES ACQUISES LORS DES CAMPAGNES DE MESURES.....	39
3.1. LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE DES SITES DES CAMPAGNES DE TERRAIN.....	39
3.2. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES SITES FORESTIERS ÉTUDIÉS	41
3.3. DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE BRILLANCE	45
3.4. DONNÉES CARACTÉRISANT LE COUVERT VÉGÉTAL (ARBRES ET SOUS-BOIS).....	48
3.4.1. Échantillonnage spatial	49
3.4.2. Échantillonnage destructif	49

3.5. DONNÉES CARACTÉRISANT LE SOL FORESTIER (COUCHES ORGANIQUES ET SOL MINÉRAL).....	54
3.5.1. Données d'humidité et de température du sol minéral	54
3.5.2. Données gravimétriques du sol minéral et du sol organique (litière et humus)	55
3.5.3. Données de rugosité de surface et d'épaisseur des couches organiques.....	58
3.6. DONNÉES AUXILIAIRES.....	58
3.7. PROFILS TEMPORELS DES DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE BRILLANCE ET ANALYSE DES TENDANCES	61
3.7.1. Profils temporels des données de température de brillance	61
3.7.2. Analyse des tendances entre les températures de brillance et l'humidité du sol	64
CHAPITRE 4. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	67
4.1. ÉVALUATION DU MODÈLE DE DIFFUSION D'ORDRE 1 BASÉ SUR LA THÉORIE DU TRANSFERT RADIATIF DE KURUM ET AL. (2011).....	67
4.1.1. Données utilisées dans l'évaluation du modèle de Kurum <i>et al.</i> (2011)	67
4.1.2. Calibration du paramètre effectif de rugosité h' du modèle de réflectivité du sol.....	70
4.1.3. Détermination de la température effective du milieu sol-couvert végétal (arbres et/ou sous-bois)	73
4.2. ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES COUCHES DE SOUS-BOIS ET DE LA LITIÈRE EN PRENANT EN COMPTE LEURS CONTRIBUTIONS DANS LE MODÈLE DE TRANSFERT RADIATIF D'ORDRE 1.....	74
4.3. ANALYSE DES PERFORMANCES DU MODÈLE D'ORDRE 1 DE KURUM ET AL. (2011) ET DU MODÈLE $\tau - \omega$ D'ORDRE 0 ET COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS RADIATIVES (T ET Ω) DES COUVERTS FORESTIERS DÉCOULANT DE CES DEUX MODÈLES	75
CHAPITRE 5. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	78
5.1. ÉVALUATION DU MODÈLE DE DIFFUSION D'ORDRE 1 BASÉ SUR LA THÉORIE DU TRANSFERT RADIATIF DE KURUM ET AL. (2011)	78
5.1.1. Résultats de la campagne SMAPVEX12.....	78

5.1.2. Résultats de la campagne du collège Mont-Ste-Anne	86
5.1.3. Résultats de la campagne du site SF-SIRENE.....	97
5.2. COMPARAISON DES PERFORMANCES DU MODÈLE D'ORDRE 1 DE KURUM ET AL.	
(2011) ET DU MODÈLE $\tau - \omega$ D'ORDRE 0 ET COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS RADIATIVES	
(τ ET ω) DES COUVERTS FORESTIERS DÉCOULANT DE CES DEUX MODÈLES	102
5.2.1. Résultats de la campagne SMAPVEX12	102
5.2.2. Résultats de la campagne du collège Mont-Ste-Anne	108
5.2.3. Résultats de la campagne du site SF-SIRENE.....	112
6. CONCLUSION	116
7. ORIGINALITÉ ET PERSPECTIVES	119
8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	122
9. ANNEXES: DONNÉES DE SIMULATION DES TROIS CAMPAGNES DE	
MESURES	133

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Architecture d'une forêt de feuillus (Winnipeg, Manitoba, Canada).....	4
Figure 2.1. Illustration des termes contribuant au modèle $\tau - \omega$	9
Figure 2.2. Schéma synoptique de l'émission de la forêt au-dessus d'un sol rugueux (Kurum <i>et al.</i> , 2011).....	15
Figure 2.3. Illustration des différents mécanismes de diffusion en bande L composant le paramètre $\Omega p(\theta)$. (a) : diffusion de l'émission du sol, (b) : diffusion de l'émission ascendante de la végétation, (c): diffusion de l'émission descendante de la végétation, (d): émission descendante de la végétation réfléchiée par le sol (Kurum <i>et al.</i> , 2011).....	18
Figure 2.4. Variations de l'émissivité en polarisation H d'une forêt de conifères dépourvus d'aiguilles (panneau haut) et avec aiguilles (panneau bas) en fonction de la biomasse sèche, de la fréquence (L, C, X) et de l'angle d'incidence (15°: panneau de gauche, 45° : panneau de droite). (P. Ferrazzoli et Guerriero, 1996).....	19
Figure 2.5. Variations de l'émissivité en polarisation H d'une forêt de feuillus dépourvus de feuilles (panneau haut) et avec feuilles (panneau bas) en fonction de la biomasse sèche, de la fréquence (L, C, X) et de l'angle d'incidence (15°: panneau de gauche, 45°: panneau de droite). (P. Ferrazzoli et Guerriero, 1996).....	20
Figure 2.6. Simulation de l'émissivité et de la transmittance en bande L et à un angle d'incidence de 35° des éléments d'une canopée de conifères en fonction de l'âge de la canopée. B: branches, N: aiguilles, U: sous-bois, S : sol, T : troncs (Ferrazzoli <i>et al.</i> , 2002).	22
Figure 2.7. Contribution des différentes couches d'une canopée de feuillus en bande L et à un angle de 30° et discrimination de la contribution des branches primaires et secondaires. (Macelloni <i>et al.</i> , 2001).....	23
Figure 2.8. Géométrie de la dérivation du modèle cohérent de réflectivité 3 couches d'un sol forestier (Air-litière et/ou sol organique - sol minéral). Schéma adapté de Ulaby <i>et al.</i> (1981).	31
Figure 2.9. Inclusions diélectriques utilisées dans l'approche de milieu effectif pour la détermination de la permittivité de litière de feuilles ϵ_L , (a): ellipsoïde représentant une feuille, (b): coupe verticale de l'ellipsoïde couvert d'une fine couche d'eau d'épaisseur $d\omega$.	

(Schwank <i>et al.</i> , 2008)	34
Figure 3.1 Zone d'étude de la campagne SMAPVEX 12 et localisation des sites forestiers (losanges rouges) (Wang <i>et al.</i> , 2016)	40
Figure 3.2. Localisation du site forestier du collège Mont-Ste-Anne (SF-MSA) et du site forestier près de la station SIRENE (SF-SIRENE) par rapport à l'Université de Sherbrooke, Québec, Canada.	41
Figure 3.3. Types de sous-bois et des couches organiques recouvrant le sol du site forestier F2.	42
Figure 3.4. Types de sous-bois et des couches organiques recouvrant le sol du site forestier F3	43
Figure 3.5. Types de sous-bois et des couches organiques recouvrant le sol forestier de la campagne SF-MSA.....	43
Figure 3.6.Types de sous-bois et des couches organiques recouvrant le sol forestier de la campagne SF-SIRENE.....	44
Figure 3.7. Configuration d'observation du sol forestier couvert de sous-bois de la campagne du site SF-MSA	46
Figure 3.8. Configuration d'observation de la campagne SF-SIRENE	47
Figure 3.9. Empreinte au sol du radiomètre en présence (à gauche) et en absence (à droite) du sous-bois de la campagne SF-MSA	47
Figure 3.10. Dimensions approximatives de l'empreinte au sol selon la configuration d'observation de la campagne du site SF-SIRENE	48
Figure 3.11. Valeurs des constantes diélectriques des tiges et des feuilles des arbustes de frêne du site SF-MSA estimées par le modèle de matières végétales de Ulaby et El-rayes (1987).....	50
Figure 3.12. Constantes diélectriques d'un tronc de peuplier faux-tremble en fonction de la profondeur radiale : a – partie réelle, b – partie imaginaire, mesurées le matin (AM-meas), l'après-midi (PM-meas) et le soir (Evening-meas) durant la campagne du site SF-SIRENE	52
Figure 3.13. Mesures de constantes diélectriques en fonction de la fréquence pour plusieurs profondeurs d'un tronc (DHP = 34 cm) de peuplier faux-tremble du site F3 de la campagne SMAPVEX12. Trait continu: partie réelle, trait discontinu: partie imaginaire.	53

Figure 3.14. Mesures de constantes diélectriques des feuilles d'un peuplier faux-tremble du site F2 d'un DHP de 21 cm de la campagne SMAPVEX12. Trait continu: partie réelle, trait discontinu: partie imaginaire.....	53
Figure 3.15. Corrélation entre les données de permittivités des sondes Decagon EC2 (2,5 cm de profondeur) et EC3 (5 cm de profondeur) et les données gravimétriques d'HS <i>in situ</i> de la campagne du site SF-MSA.....	57
Figure 3.16. Profil temporel des TB mesurées avec le radiomètre au sol durant la campagne SF-MSA. 23-Mor-UR: mesure sans la couche de sous-bois,	62
Figure 3.17. Profil temporel des TB aéroportées PALS sur le site F3 de la campagne....	62
Figure 3.18. Profil temporel des TB aéroportées PALS sur le site F2 de la campagne....	62
Figure 3.19. Profil temporel des TB mesurées avec le radiomètre au sol durant la campagne SF-SIRENE. 01-09-Anoon-BLR: mesure avant l'enlèvement de la litière, 01-09-Anoon-ALR: mesure juste après l'enlèvement de la couche de litière, 02-09-Mor-LR: mesures sans la couche de litière.	63
Figure 3.20. Corrélation entre les TB mesurées en polarisation H et les données d'HS sur les trois sites forestiers d'étude	65
Figure 3.21. Corrélation entre les TB mesurées en polarisation V et les données d'HS sur les trois sites forestiers d'étude	65
Figure 4.1. Organigramme de la démarche méthodologique adoptée	69
Figure 5.1. Profils temporels des TB aéroportées PALS et des températures physiques mesurées du sol (0, 5, 10 cm de profondeur), de l'air et du couvert forestier (IRT) sur le site F2 de la campagne SMAPVEX12.....	79
Figure 5.2. Profils temporels des TB aéroportées PALS et des températures physiques mesurées du sol (0, 5, 10 cm de profondeur), de l'air et du couvert forestier (IRT) sur le site F3 de la campagne SMAPVEX12.....	79
Figure 5.3. Corrélations des TB en polarisations H et V acquises sur le site F2 avec les mesures des températures physiques du sol (5 cm de profondeur), de l'air et du couvert forestier (IRT)	80
Figure 5.4. Corrélations des TB en polarisations et V acquises sur le site F3 avec les mesures des températures physiques du sol (5 cm de profondeur), de l'air et du couvert forestier (IRT)	81

Figure 5.5. Panneau du haut: comparaison des réflectivités trois-couches (sol minéral, sol organique, air) et deux-couches (sol minéral, air) du sol forestier du site F2. Panneau du bas: zoom du panneau du haut autour de l'angle d'incidence d'intérêt (40°).	82
Figure 5.6. Panneau du haut: comparaison des réflectivités trois-couches (sol minéral, sol organique, air) et deux-couches (sol minéral, air) du sol forestier du site F3. Panneau du bas: zoom du panneau du haut autour de l'angle d'incidence d'intérêt (40°).	83
Figure 5.7. Comparaison des permittivités du sol minéral des sites forestiers F2 et F3 calculées avec le modèle de Dobson <i>et al.</i> (1985) et le modèle de Mironov <i>et al.</i> (2009)	83
Figure 5.8. Comparaison des observations de PALS (H et V) sur le site F2 avec les simulations obtenues avec la solution K1 du modèle de Kurum <i>et al.</i> (2011)	84
Figure 5.9. Comparaison des observations de PALS (H et V) sur le site F3 avec les simulations obtenues avec la solution K1 du modèle de Kurum <i>et al.</i> (2011)	85
Figure 5.10. Profils temporels des TB et températures physiques mesurées du sol (2,5 et 5 cm de profondeur) et de de l'air sur le site SF-MSA	87
Figure 5.11. Figure de gauche : Variation de l'erreur d'optimisation en fonction du paramètre de rugosité effectif h' sur le site SF-MSA. Figure de droite : zoom de la figure de gauche montrant en rouge les erreurs optimales et les valeurs optimales de h'	89
Figure 5.12. Comparaison des permittivités du sol minéral du site SF-MSA calculées avec le modèle de Dobson <i>et al.</i> (1985) et le modèle de Mironov <i>et al.</i> (2009)	90
Figure 5.13. Panneau du haut : comparaison des réflectivités trois-couches (sol minéral, sol organique, air) et deux-couches (sol minéral, air) du sol du site SF-MSA. Panneau du bas: zoom du panneau du haut autour de l'angle d'incidence d'intérêt (40°).	91
Figure 5.14. Comparaison des simulations de la solution K1 obtenues avec trois températures effectives (sol, air, composite air-sol) avec les observations du radiomètre selon la température effective utilisée sur le site SF-MSA.	92
Figure 5.15. Erreurs d'optimisation en fonction de la valeur du paramètre Bt pour les polarisations H et V du site SF-MSA	93
Figure 5.16. Comparaison des mesures du radiomètre avec les simulations en polarisation H de la solution K1 obtenues avec les températures effectives optimisées du site SF-MSA	94

Figure 5.17. Corrélation entre les températures effectives estimées et les températures physiques du sol (5 cm de profondeur) et de l'air sur le site SF-MSA.....	95
Figure 5.18. Comparaison des TB simulées et mesurées durant toute la campagne du site SF-MSA.....	96
Figure 5.19. Profils temporels des TB et températures physiques mesurées du sol (2,5 et 5 cm de profondeur) et de de l'air sur le SF-SIRENE. BLR : avant enlèvement de la couche de litière; ALR : après enlèvement de la couche de litière; LR : litière enlevée.	97
Figure 5.20. Variation de l'erreur d'optimisation en fonction du paramètre effectif de rugosité h' sur le site SF-SIRENE. Erreurs optimales et h' optimal sont indiqués avec un petit rectangle noir (rmse Dobson-mod) et un petit cercle noir (rmse Mironov-mod).	99
Figure 5.21. Figure de gauche: Comparaison des simulations de la solution K1 en polarisation H avec les mesures du radiomètre sur le site SF-SIRENE.	100
Figure 5.22. Figure de gauche: Comparaison des simulations de la solution K1 en polarisation V avec les mesures du radiomètre sur le SF-SIRENE.	100
Figure 5.23. Profils temporels d'albédo effectif, calculé théoriquement (équation 2.13) en polarisation H et en polarisation V sur le site F2 (à gauche) et le site F3 (à droite), de l'humidité du sol, et du contenu en eau gravimétrique de la couche de sol organique ..	103
Figure 5.24. Erreur quadratique moyenne (K) en fonction des paramètres τ et ω . Valeurs optimales des paramètres τ et ω * correspondant à l'erreur optimale sont identifiées par les coordonnées du point rouge. Site F2.....	105
Figure 5.25. Erreur quadratique moyenne (K) en fonction des paramètres τ et ω . Valeurs optimales des paramètres τ et ω * correspondant à l'erreur optimale sont identifiées par les coordonnées du point rouge. Site F3.....	105
Figure 5.26. Comparaison des solutions K0 et K1 du modèle de Kurum <i>et al.</i> (2011) avec les simulations du modèle $\tau - \omega$ sur le site F2	106
Figure 5.27. Profil temporel de l'albédo effectif, calculé théoriquement (équation 2.13), en polarisation H et en polarisation V sur le site SF-MSA.....	109
Figure 5.28. Variabilité de l'erreur d'optimisation en fonction des valeurs des paramètres τ et ω * sur le site SF-MSA.....	110
Figure 5.29. Comparaison des solutions K0 et K1 du modèle de Kurum <i>et al.</i> (2011) avec	

les simulations du modèle $\tau - \omega$ sur le site SF-MSA	111
Figure 5.30. Profil temporel de l'albédo effectif, calculé théoriquement (équation 2.13) par le modèle de Kurum <i>et al.</i> (2011), en polarisation H et en polarisation V sur le site SF-SIRENE.....	112
Figure 5.31. Erreur quadratique moyenne (K) en fonction des paramètres τ et ω en polarisation H (à gauche) et en polarisation V (à droite) sur le site SF-SIRENE. Les valeurs optimales des paramètres τ et ω *correspondant à l'erreur optimale sont identifiées par les coordonnées du point rouge.	113
Figure 5.32. Comparaison des solutions K0 et K1 du modèle de Kurum <i>et al.</i> (2011) avec les simulations du modèle $\tau - \omega$ sur le site SF-SIRENE.....	114

LISTE DES TABELAUX

Tableau 3.1 Caractéristiques des sites forestiers d'étude.....	44
Tableau 3.2. Caractéristiques de mesures du radiomètre du CARTEL	45
Tableau 3.3. Données recueillies du couvert végétal (arbres et/ou sous-bois) et du sol (sol minéral et sol organique) durant les campagnes de mesures et leurs utilisations	60
Tableau 5.1. Erreur de simulation (litière et sous-bois inclus) de la solution K1 du modèle de Kurum, <i>et al.</i> (2011) sur les sites F2 et F3	86
Tableau 5.2. Résultat de l'optimisation (équation 4.1) du paramètre effectif de rugosité h' sur le site SF-MSA.....	89
Tableau 5.3. Résultat de l'optimisation (équation 4.7) du paramètre effectif de rugosité h' sur le site SF-SIRENE	98
Tableau 5.4. Erreurs de simulation de la solution K1 du modèle de Kurum <i>et al.</i> (2011) en fonction des températures effectives utilisées sur le site SF-SIRENE.....	101
Tableau 5.5. Paramètres radiatifs τ et ω du couvert végétal forestier (arbres et sous-bois) calculés théoriquement par le modèle de Kurum <i>et al.</i> (2011) sur les sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12	103
Tableau 5.6. Paramètres τ et ω * issus du processus d'optimisation du modèle $\tau - \omega$ avec les données acquises sur les sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12.....	104
Tableau 5.7. Comparaison des erreurs de simulations des solutions K0 et K1 du modèle de Kurum <i>et al.</i> (2011) avec les simulations du modèle $\tau - \omega$ sur les sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12	107
Tableau 5.8. Calcul théorique (équations 2.9 et 2.11) des paramètres radiatifs τ et ω du couvert végétal (sous-bois) du site SF-MSA	108
Tableau 5.9. Comparaison des erreurs de simulations des TB en polarisation H des solutions K0 et K1 du modèle de Kurum <i>et al.</i> (2011) avec les simulations du modèle $\tau - \omega$ sur le site SF-MSA.....	111
Tableau 5.10. Calcul théorique (équations 2.9 et 2.11) des paramètres radiatifs τ et ω du couvert végétal forestier (arbres et sous-bois) du site SF-SIRENE.....	112
Tableau 5.11. Paramètres radiatifs effectifs τ et ω * issus du processus d'optimisation du modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0 sur le site SF-SIRENE.....	113

Tableau 5.12. Évaluation statistique des simulations des solutions K0 et K1 du modèle de Kurum <i>et al.</i> (2011) avec le modèle $\tau - \omega$ après l'optimisation de τ et ω	115
---	-----

Liste des acronymes

HS: Humidité du Sol

MOP: Micro-Ondes Passives

rmse: Root Mean Square Error (Erreur quadratique moyenne)

Solution K0: solution de diffusion d'ordre 0 du modèle de Kurum *et al.* (2011);

Solution K1: solution de diffusion d'ordre 1 du modèle de Kurum *et al.* (2011);

SF-MSA: campagne du site forestier du collège de Mont-Ste-Anne;

SF-SIRENE: campagne du site forestier proche de la station SIRENE de l'Université de Sherbooke;

SMAP: Soil Moisture Active Passive;

SMAPVEX12: Soil Moisture Active Passive EXperiment in 2012, Winnipeg, Manitoba, Canada.

SMOS: Soil Moisture and Ocean Salinity

SIRENE: Site Interdisciplinaire de Recherche en Environnement Extérieur;

TB: Températures de Brilliance

TR: Transfert Radiatif

Remerciements

Je souhaite remercier mes directeurs de recherche, les professeurs Ramata Magagi et Kalifa Goïta, du Département de Géomatique appliquée de l'Université de Sherbrooke, pour leur supervision et leur soutien financier durant l'accomplissement de cette thèse. Toutes nos rencontres de travail faisaient jaillir des interrogations qui m'avaient permis de rehausser en permanence la qualité de mon travail sur tous les plans au fur et à mesure que j'avancais dans mes travaux. Je remercie aussi les membres du jury qui ont accepté d'examiner cette thèse. Mes remerciements et ma reconnaissance vont à l'égard de Dr. Mehmet Kurum, professeur adjoint au Electrical Engineering Department, Mississippi University, ÉU, pour m'avoir remis le code du modèle sur lequel j'ai travaillé. Je le remercie aussi pour m'avoir initié à ce modèle lors d'un stage, pour ces conseils et ces recommandations.

Je remercie monsieur HuiZhong Lu, analyste en calcul scientifique à l'Université de Sherbrooke, au Réseau Québécois de Calcul de Haute Performance (RQCHP), pour son support technique lors de l'utilisation du supercalculateur Mammouth. Je tiens aussi à remercier le professeur Alexandre Langlois pour nous avoir prêté le radiomètre en bande L utilisé dans les campagnes terrain du site forestier du collège de Mont-Ste-Anne et de celui près de la station SIRENE de l'université de Sherbrooke. J'adresse également mes remerciements et ma reconnaissance à Alexandre Roy, Post doctorant à l'Université de Sherbrooke, aujourd'hui professeur à l'Université du Québec à Trois Rivières, pour son aide lors de l'installation de l'équipement des mesures terrain et pour le post traitement des données, sans oublier les discussions enrichissantes qu'on a eues même si elles ne furent pas nombreuses. Ce fut toujours un plaisir de travailler avec lui. Également, je remercie Alex Mavrovic pour les mesures de permittivités des arbres.

L'acquisition de certaines des données terrain a été possible avec le concours de plusieurs étudiants, que je remercie énormément pour leur disponibilité. Je pense à Mohamed Amine Touré, Mahdi Djama Rayaleh, Xin Wen, Kevin Siebels, Juliette Lapeyre, Jawad Ziyad, Ghofran Dridi. Si j'ai omis quelqu'un, qu'il m'en excuse.

Je remercie ma famille et ma belle-famille pour leur soutien indéfectible et permanent.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents et beaux-parents, à ma chère femme Salima, mes enfants Sidra et Idris.

Chapitre 1. Introduction

1.1. Mise en contexte général

L'Humidité du Sol (HS) surfacique est le contenu en eau de la couche supérieure (0-5 cm) du sol minéral. Elle est classée par le *Global Climate Observing System* (<https://www.ncdc.noaa.gov/gosic/global-climate-observing-system-gcos>) comme une des Variables Climatiques Essentielles (VCE). En effet, cette grandeur contrôle la transpiration et la photosynthèse des plantes dans plusieurs régions du monde, ce qui entraîne des impacts sur l'eau, l'énergie et les cycles biogéochimiques (Seneviratne *et al.*, 2010). De plus, elle intervient dans un certain nombre d'interactions aux échelles locale, régionale et globale et joue un rôle majeur dans les projections des changements climatiques (Seneviratne *et al.*, 2010). À titre d'exemple, cette grandeur influe sur plusieurs processus hydrologiques de sorte que l'observation et la prédiction de cette variable sont très importantes pour la compréhension du cycle hydrologique (Martens *et al.*, 2015). Des périodes prolongées de faibles contenus en eau du sol peuvent donner lieu à des phénomènes de sécheresse avec de graves conséquences sur les cultures, l'aménagement forestier et la vie humaine. De la même façon, des valeurs élevées de contenu en eau du sol augmentent la probabilité d'occurrence de phénomènes d'inondations (Martens *et al.*, 2015). Pour une surface terrestre végétalisée, la moyenne spatiale et la variance de l'HS peuvent être corrélées avec la variabilité spatiale de la biomasse végétale. Cette biomasse végétale est caractérisée par une structure tridimensionnelle (3-D) d'attributs variant spatialement tels que la densité foliaire, l'indice de surface foliaire (LAI), les propriétés optiques des feuilles, la hauteur des arbres et la discontinuité d'occupation spatiale. Ces attributs de la canopée influencent la variabilité de la teneur en eau du sol à des échelles spatiales très fines grâce aux processus d'interception des précipitations et de transpiration à la suite de l'absorption de l'HS par la végétation (He *et al.*, 2014). Dès lors, l'information sur la variabilité spatiale et temporelle de l'HS est primordiale pour mettre au point des modèles d'interaction terre-atmosphère (Savva *et al.*, 2013)

Les méthodes in situ de mesures de l'HS via les mesures gravimétriques ou l'utilisation de sondes sont coûteuses, consomment beaucoup de temps et ne peuvent couvrir de grandes

surfaces. De ce fait, ces méthodes ne peuvent fournir des produits d'HS qui répondent aux besoins grandissants dans domaines, comme l'hydrologie, la météorologie ou la climatologie. Ces applications nécessitent des produits d'HS de résolutions spatiales et temporelles différentes. Le recours aux données de télédétection acquises dans le domaine des micro-ondes, particulièrement les micro-ondes passives (MOP), constitue une alternative aux méthodes in situ.

Le signal MOP des surfaces naturelles dépend de plusieurs facteurs physiques et géométriques. Il est fonction de la permittivité diélectrique, de la structure et de la température d'une cible donnée (Pampaloni, 2004). Les paramètres de la cible influençant majoritairement l'émissivité des surfaces naturelles sont le contenu en eau du sol et celui du couvert végétal. De ce fait, un capteur MOP est particulièrement efficace pour détecter l'HS et le contenu en eau des plantes qui est directement lié à la biomasse du couvert végétal (Pampaloni, 2004). En effet, dans la plage de fréquences allant de 1 à 5 GHz, l'émission du sol est directement liée à la constante diélectrique du sol qui est fortement dépendante de son contenu en eau (Njoku et Entekhabi, 1996). Plus il y a de molécules d'eau libres, plus importante est la constante diélectrique. À titre d'exemple, la constante diélectrique de l'eau est ~ 80 pour des fréquences inférieures à 5 GHz et celle du sol sec est $\sim 3,5$. Pour un sol à une température de 300 K, cette différence importante de constantes diélectriques entre un sol sec et un sol humide produit une plage de variation de ~ 90 K en termes de Températures de Brillance (TB). Cette plage de variation dépend aussi du type de sol. Néanmoins, plusieurs autres facteurs influent sur les TB observées: rugosité du sol, couvert végétal, modèle de constante diélectrique du sol, hétérogénéité de la surface, texture du sol et variabilité de la température du sol et de la végétation. Pour des longueurs d'onde supérieures à 10 cm (bande L), les effets de la rugosité et de la végétation sont moins prononcés. Aussi, aux mêmes longueurs d'onde, et pour des terrains à couverture faible ou modérée de végétation, l'effet de l'HS est dominant sur les TB observées (Wang et Choudhury, 1995), ce qui implique que le couvert végétal est semi-transparent en bande L. Aussi, en bande L, le signal MOP profite d'une profondeur de pénétration plus importante (~ 5 cm) dans le sol comparativement aux fréquences élevées (Njoku et Entekhabi, 1996). Les améliorations obtenues dans la modélisation des différents facteurs

affectant le signal MOP sont exposées en détail dans Wigneron *et al.* (2017). Une modélisation quantitative de l'impact de ces différents facteurs permettrait une exploitation effective des données MOP de télédétection pour améliorer l'estimation de l'HS.

Au vu des avantages offerts par la bande L, des missions satellitaires, basées sur les mesures MOP en bande L, telles que *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS) de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et *Soil Moisture Active Passive* (SMAP) de *National Aeronautics and Spatial Agency* (NASA), ont pour objectif principal l'estimation de l'HS à une échelle globale avec une précision espérée de $0,04 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (Entekhabi *et al.*, 2010). Les radiomètres de ces deux missions observent des pixels au sol d'une résolution spatiale de l'ordre de 40 km.

1.2. Problématique

Des études théoriques avaient montré que les données MOP peuvent contribuer à l'étude globale du sol et des propriétés du couvert végétal de milieux forestiers (Ferrazzoli *et al.*, 2002; Karam, 1994). Avec des observations aéroportées multifréquences en MOP (L, C, X, Ka) conduites sur différents types de forêts, la combinaison des données acquises en bande X et celles en bande Ka avait montré leur utilité pour séparer les types de forêt (Macelloni *et al.*, 2001). Selon la même étude, les données de la bande L sont les plus corrélées au volume de bois des arbres.

Un milieu forestier composé de feuillus est constitué de plusieurs couches, à savoir la couronne des arbres (branches et feuilles), les troncs, le sous-bois et le sol (voir figure 1.1). Ce dernier comprend généralement des couches organiques (litière et humus) superposées au-dessus du sol minéral. Une telle architecture complexe des forêts complique la modélisation de leurs émissivités dans le domaine des micro-ondes (Chukhlantsev, 2006). Dans une perspective de l'estimation de l'HS sur ce type de surfaces, il est primordial de comprendre, à travers des observations et des simulations de modèles, l'effet des différentes couches (sol minéral, sol organique, litière, sous-bois, arbres) et de leurs propriétés géométriques et diélectriques sur le signal mesuré.

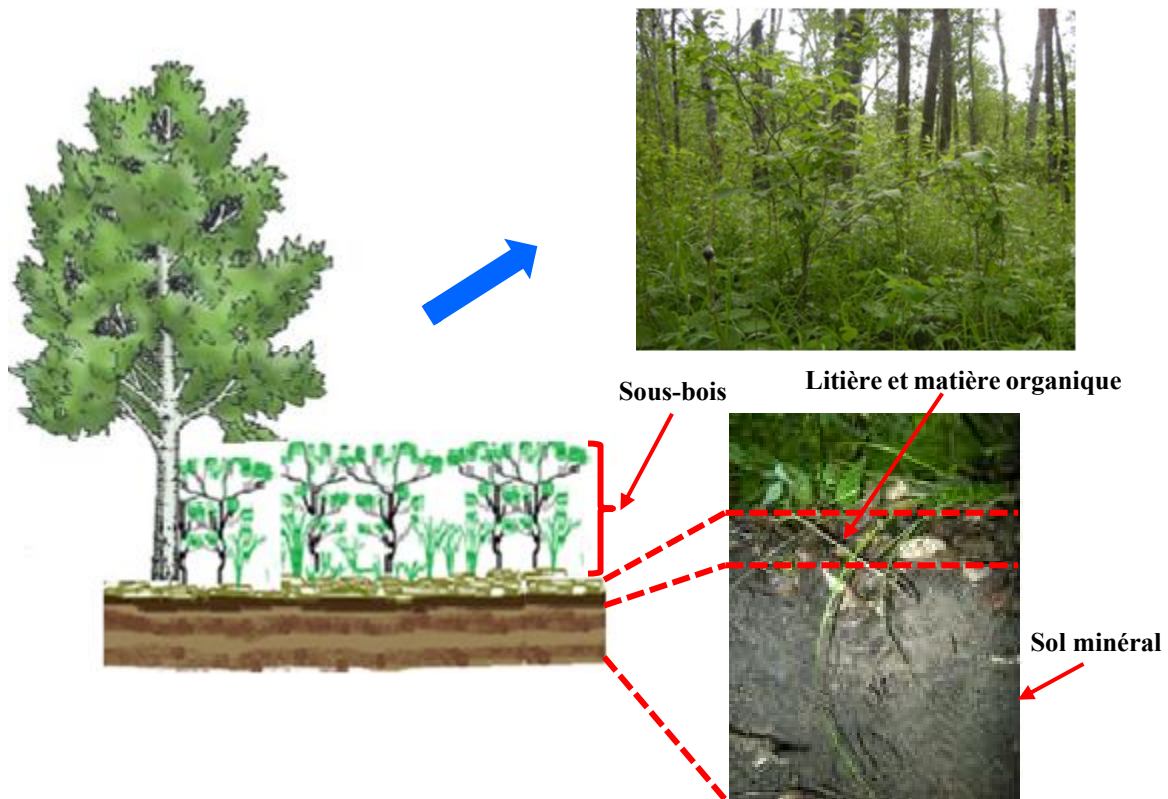


Figure 1.1. Architecture d'une forêt de feuillus (Winnipeg, Manitoba, Canada).

En bande L, l'atténuation de la canopée (branches, feuilles et troncs) de la forêt est moins prononcée relativement aux fréquences élevées (Rahmoune *et al.*, 2013). Pour la végétation basse, l'épaisseur optique peut être reliée simplement (linéairement) à la biomasse avec une précision raisonnable (Rahmoune *et al.*, 2013) ou au contenu en eau de la végétation (O'Neill *et al.*, 2008). Les mêmes relations ne peuvent être facilement transposables pour le cas des forêts, qui sont caractérisées par des propriétés géométriques et diélectriques différentes (Wigneron *et al.*, 2007). Le Vine et Karam (1996) ont démontré que pour des canopées dont les éléments (branches, troncs, etc.) ont des dimensions supérieures à la longueur d'onde considérée, la relation linéaire entre l'atténuation de la canopée et son contenu en eau n'est plus vérifiée. La pente de la relation devient une fonction complexe de la fréquence, du contenu en eau global et de l'architecture de la canopée. En bande L, l'atténuation de la forêt dépend principalement du contenu en eau des branches (Ferrazzoli

et al., 2002). Aussi, parmi les éléments de la canopée, les branches, précisément les branches de taille importante, sont les éléments contribuant le plus à l'émission et à l'atténuation. Par contre, les feuilles, les troncs et le sous-bois ont une contribution mineure en bande L.

Pour ce qui est de l'impact de la couche de sous-bois, très peu de travaux l'ont abordé. Des simulations théoriques en bande L, sur une forêt de conifères, en fonction du volume de bois des branches et de l'âge des arbres ont montré que l'impact d'un sous-bois dense est plus important pour des forêts jeunes (20 ans) où il introduit un effet dépolarisant (Ferrazzoli *et al.*, 2002). En polarisation H, l'émissivité de la forêt est insensible à la présence du sous-bois (Pampaloni, 2004). En polarisation V, sa présence fait augmenter l'émissivité et la sensibilité à la biomasse est réduite (Pampaloni, 2004).

L'impact de la couche de litière a relativement reçu plus d'attention. Plusieurs études (Della Vecchia *et al.*, 2007; Grant *et al.*, 2009; Schwank *et al.*, 2008; Kurum *et al.*, 2012a) s'accordent sur le comportement de cette couche. En conditions sèches, cette couche est transparente par rapport à l'émission du sol, alors qu'elle devient une couche-écran de l'émission du sol et une source d'émission en conditions humides. En utilisant des données in situ d'un site forestier de conifères, dont le sol minéral est couvert d'une couche de sol organique (humus) et de litière, Kurum *et al.* (2012a) avaient montré avec des simulations que la présence de la couche d'humus, résultant de la décomposition des branches et des feuilles, contribue à l'augmentation de la diffusion d'ordre 1 qui se produit dans un milieu forestier. Dans le cas de cette étude, la couche d'humus est plus humide que la couche de litière.

La simulation des températures de brillance d'un sol couvert de végétation et l'estimation de l'HS sont communément faites avec le modèle de Transfert Radiatif (TR) d'ordre zéro $\tau - \omega$. τ et ω sont respectivement l'épaisseur optique et l'albédo de simple diffusion du couvert végétal (Mo *et al.*, 1982). Ces deux paramètres caractérisent respectivement les propriétés d'atténuation et les propriétés de diffusion simple de la végétation (Mo *et al.*, 1982; Wigneron *et al.*, 2003). Ce modèle est utilisé pour sa simplicité d'implémentation et sa facilité d'inversion (Jackson, 1993; Njoku *et al.*, 2003; Owe *et al.*, 2001; Wigneron *et*

al., 2007). Pour ces raisons, ce modèle est adopté par les missions SMOS et SMAP afin d'estimer les paramètres radiatifs τ et ω de couverts végétaux et les produits d'HS.

Dépendamment du niveau de diffusion se produisant dans la canopée, l'approximation d'ordre zéro a une validité limitée (Ferrazzoli *et al.*, 2002; Kurum *et al.*, 2012b), particulièrement à des fréquences élevées et en présence de végétation dense (forêt, plante de maïs en pleine croissance), car il ne prend pas en considération les diffusions multiples se produisant dans ce type de couverts. Des modèles plus sophistiqués sont requis pour remédier aux limites du modèle $\tau - \omega$ ou bien une modification de celui-ci est impérative. Ceci dans le but de prendre en considération d'une part l'effet des différentes couches sur l'estimation de l'HS, et d'autre part prendre en considération la diffusion multiple.

Une des solutions pour remédier aux limites du modèle $\tau - \omega$ est de définir des paramètres effectifs τ et ω représentatifs des processus d'émission et d'atténuation se produisant dans un milieu forestier (Ferrazzoli *et al.*, 2002; Kurum *et al.*, 2012b). Pour ce faire, d'un côté ces paramètres (τ et ω) peuvent être optimisés ou calibrés à partir de mesures in situ. D'un autre côté, ces deux paramètres peuvent aussi être calculés théoriquement avec des mesures expérimentales détaillées (dimension, orientation angulaire, constante diélectrique, densité) des éléments constituant le couvert forestier.

À l'heure actuelle, les estimations de l'HS faites par les missions satellitaires SMOS et SMAP sur les couverts forestiers sont de très faibles qualités à cause des difficultés de modélisation introduites par les différentes couches le constituant et de leurs propriétés radiatives. Aussi, un mauvais paramétrage de τ et ω et des paramètres de rugosité du sol peuvent dégrader encore plus la qualité de l'estimation (Chan *et al.*, 2016). Selon les mêmes auteurs, des effets saisonniers de τ et ω doivent aussi être pris en considération dans des études multitemporelles.

1.3. Objectifs

L'objectif principal de ce travail de recherche est la compréhension de l'interaction des températures de brillance en bande L avec des milieux forestiers afin de dégager le potentiel d'estimation de l'HS.

Les objectifs spécifiques qui vont nous permettre d'atteindre cet objectif sont :

- Évaluer un modèle de TR d'ordre 1 en utilisant des données aéroportées et des données in situ acquises avec un radiomètre sur des sites forestiers ;
- Étudier l'influence des couches de sous-bois et de la litière en prenant en compte leurs contributions dans le modèle de TR d'ordre 1 ;
- Analyser les performances du modèle de TR d'ordre 1 par rapport au modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0 couramment utilisé, ainsi que les propriétés radiatives (τ et ω) des couverts forestiers découlant de ces deux modèles.

1.4. Hypothèses

L'hypothèse principale sur laquelle est construit le projet est que la compréhension de l'interaction des températures de brillance en bande L avec un milieu forestier est conditionnée par la caractérisation du comportement radiatif des différentes couches le constituant.

Cette hypothèse principale est appuyée par deux hypothèses spécifiques :

- La contribution de la couche de litière peut être prise en compte à travers un modèle simplifié du sol forestier à trois couches (air, litière et/ou sol organique, sol minéral) (Della Vecchia *et al.*, 2007);
- L'effet du sous-bois sur l'émissivité globale de la forêt dépendrait de la densité de la forêt (Ferrazzoli *et al.*, 2002).

Les parties ultérieures de ce document sont organisées comme suit. Le chapitre 2 est dédié au cadre théorique où tous les aspects liés à la modélisation MOP de couverts forestiers ainsi que les défis actuels seront abordés. Le chapitre 3 est consacré à la présentation des données expérimentales acquises ayant permis de concrétiser les objectifs fixés dans le cadre de cette thèse. La méthodologie de recherche adoptée est exposée dans le chapitre 4. Tous les résultats obtenus et leurs discussions sont présentés dans le chapitre 5. Ce document est clôturé par le chapitre 6 qui résume les résultats importants des travaux de recherche entrepris tout en faisant le point sur leur originalité. Des pistes de recherche sont avancées comme perspectives aux travaux réalisés.

Chapitre 2. Cadre théorique

Le couvert forestier atténue la contribution du sol par les phénomènes de diffusion et d'absorption tout en contribuant à l'émission globale du couvert végétal (Kurum *et al.*, 2011). À ceci s'ajoutent les interactions (atténuation, émission) résultant de la couche de litière recouvrant le sol de la forêt (Grant *et al.*, 2009; Kurum *et al.*, 2012a) et de la couche de sous-bois (arbustes, herbes, végétation basse). L'effet de la couche de sous-bois reste peu exploré et documenté. Dès lors, une compréhension quantitative et précise des phénomènes de diffusion et d'absorption se produisant dans un milieu forestier est requise pour dégager le potentiel d'estimation de l'HS.

2.1. Modélisation de l'émission micro-onde de la végétation

L'approche couramment utilisée pour la simulation des températures de brillance est la théorie du Transfert Radiatif (TR). Cette théorie traite les diffusions simples et les diffusions multiples selon l'ordre de la solution des équations de TR considéré. Elle ne considère que l'intensité de la radiation électromagnétique et ignore les effets cohérents (Kurum *et al.*, 2011).

Nous distinguons deux approches basées sur la théorie du TR: l'approche qui considère la canopée comme un milieu continu et l'approche basée sur un milieu discret (Karam *et al.*, 1992). Dans la première approche, la canopée est considérée comme une seule couche continue caractérisée par une fonction aléatoire de fluctuation de la permittivité (Fung et Fung, 1977). Dans la deuxième approche, la végétation est considérée comme un milieu discret contenant des diffuseurs distribués aléatoirement, caractérisés en termes de dimensions et de forme, d'orientation, de densité et de contenu en eau (Ferrazzoli et Guerriero, 1996; Karam *et al.*, 1997; Kurum *et al.*, 2011). Wigneron *et al.* (1995) avaient proposé une approche composite, basée sur la combinaison de l'approche discrète et de l'approche continue, dans le but d'estimer l'HS par inversion de modèle. L'approche composite combine les avantages de l'approche discrète dans la modélisation de l'albédo de simple diffusion ω et les avantages de l'approche continue dans la modélisation du coefficient de diffusion K_s . Les approches présentées précédemment sont utilisées pour la simulation des TB de sols couverts de végétation, mais un modèle plus simple par rapport

à ces deux approches, en l'occurrence le modèle $\tau - \omega$, a largement été utilisé.

2.1.1. Le modèle semi-empirique $\tau - \omega$

Le modèle $\tau - \omega$ est un modèle semi-empirique de diffusion d'ordre zéro des équations de TR (Mo *et al.*, 1982). L'ordre zéro indique que la fonction de phase de diffusion est supposée négligeable dans les équations de TR et est mise à zéro. Ce modèle considère la végétation (canopée) comme une couche uniforme avec une température constante (Mo *et al.*, 1982; Jackson, 1993). La couche de végétation est responsable du processus de diffusion, caractérisé par l'albédo de simple diffusion ω , et du processus d'atténuation caractérisé par l'épaisseur optique τ . Dans un contexte pur de modélisation où le radiomètre observe uniquement une couverture végétale homogène dans son empreinte au sol, les trois contributions de ce modèle sont illustrées sur la figure 2.1. Dans un autre contexte, tel que dans le cas des mesures acquises par les radiomètres de missions spatiales SMOS et SMAP, ayant des résolutions grossières ($\sim 40 \text{ km}$) de pixel, il faut tenir compte de l'hétérogénéité du pixel. De ce fait, pour un pixel donné, les contributions individuelles de toutes les couvertures qui s'y trouvent, doivent être modulées par les fractions surfaciques qu'elles occupent, puis additionnées par la suite. De plus, pour les observations spatiales et même celles acquises en bande L, il faut corriger les effets d'atténuation atmosphérique. En revanche, pour les observation aéroportées et *in situ*, ces effets sont négligeables (Gao *et al.*, 2004).

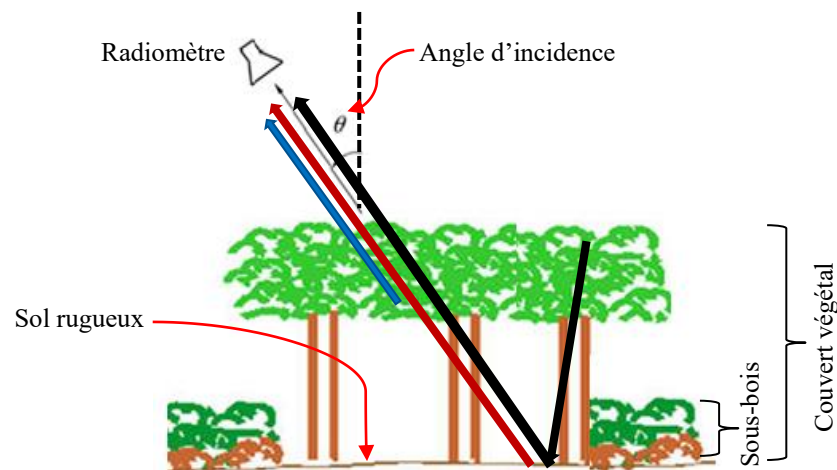


Figure 2.1. Illustration des termes contribuant au modèle $\tau - \omega$

Sur la figure 2.1, la contribution directe de la végétation est illustrée en bleu, la contribution du sol atténuée par la végétation en rouge et en noir la contribution de la végétation réfléchie par le sol et atténuée par la canopée des arbres (arbres et sous-bois). Les expressions mathématiques de ces trois contributions en termes de TB, sont données dans le même ordre à travers les trois quantités du deuxième membre de l'équation 2.1 (Ulaby *et al.*, 1986). θ est l'angle d'incidence et p (H ou V) la polarisation de l'onde électromagnétique.

$$Tb_p(\theta) = (1 - \omega_p(\theta))(1 - \gamma_p(\theta))T_v + \gamma_p(\theta)(1 - R_p(\theta))T_s \\ + (1 - \omega_p(\theta))(1 - \gamma_p(\theta))T_v(\theta)\gamma_p(\theta)R_p(\theta) \quad 2.1$$

L'équation 2.2 simplifie l'équation 2.1 en prenant comme facteur commun la contribution de la végétation. Pour alléger l'équation, l'angle d'incidence sera omis dans l'équation 2.2. L'indice de la polarisation sera quant à lui conservé.

$$Tb_p = (1 - \omega_p)(1 - \gamma_p)(1 + R_p\gamma_p)T_v + \gamma_p(1 - R_p)T_s \quad 2.2$$

R_p est la réflectivité du sol rougeux. ω_p et γ_p sont respectivement l'albédo de simple diffusion et la transmissivité du couvert végétal. L'albédo de simple diffusion est donné par l'équation 2.3.

$$\begin{cases} \omega_p(\theta) = \frac{K_{sp}(\theta)}{K_{ep}(\theta)} \\ K_{ep}(\theta) = K_{sp}(\theta) + K_{ap}(\theta) \end{cases} \quad 2.3$$

Où K_{sp} et K_{ep} sont respectivement les coefficients de diffusion et d'extinction du couvert végétal, le coefficient d'extinction étant la somme du coefficient de diffusion K_{sp} et d'absorption K_{ap} . Par définition, la transmissivité γ_p est exprimée en fonction de l'épaisseur optique τ_p (équation 2.4). L'épaisseur optique est fonction du coefficient

d'extinction K_{ep} et de la profondeur de la couche de végétation d (Mo *et al.*, 1982).

$$\begin{cases} \gamma_p(\theta) = e^{-\tau_p(\theta)/\cos\theta} \\ \tau_p(\theta) = K_{ep}(\theta) \cdot d \end{cases} \quad 2.4$$

Pour de la végétation basse et herbacée, l'épaisseur optique peut être liée linéairement au contenu en eau de la végétation (Shutko et Chukhlantsev, 1982; Jackson et Schmugge, 1991). T_v et T_s sont respectivement les températures effectives du couvert végétal et du sol minéral. Un radiomètre observant une cible, le couvert végétal dans notre cas, intègre une température qui est fonction de toutes les sources de température qui sont dans son champ de vision, d'où la complexité de définir une équation qui fait le bilan de toutes ces sources thermiques.

La température effective du couvert végétal est approchée par la température de l'air. Pour la température effective du sol, l'expression simple de l'équation 2.5 a largement été utilisée si des données du profil de températures du sol sont disponibles (Choudhury *et al.*, 1982).

$$T_S = T_{soil_depth} + C_t(T_{soil_surface} - T_{soil_depth}) \quad 2.5$$

Où T_{soil_depth} est la température du sol en profondeur (50 à 100 cm) et $T_{soil_surface}$ est la température de surface (0 à 5 cm) (Wigneron *et al.*, 2001). C_t est une fonction qui quantifie la dépendance de T_s à la profondeur. Cette fonction dépend du profil thermique et du contenu en eau du sol. Elle dépend aussi de la longueur d'onde (Choudhury *et al.*, 1982). C_t a été calibré pour plusieurs fréquences. Pour la bande L, sa valeur est 0,246. C_t dépend aussi de l'HS (Wigneron *et al.*, 2001). C_t tend vers 0 pour des sols secs où la contribution des couches inférieures à la température effective est prépondérante. Si le sol est très humide, la valeur de C_t est importante. La formule de l'équation 2.5 est adoptée dans le cadre de la mission SMAP.

Pour des terrains couverts de végétation, une formulation simple de température effective

sol-couvert végétal (T_{sv}), exprimée en fonction de la température effective du sol et de la température effective de la végétation, a été formulée dans le modèle L-band *Microwave Emission of the Biosphere* (L-MEB) de la mission SMOS (Wigneron *et al.*, 2007). Cette formulation est donnée par l'équation 2.6 qui a aussi été utilisée dans le cas d'un milieu forestier (Grant *et al.*, 2009).

$$\begin{cases} T_{sv} = A_t T_v + (1 - A_t) T_s \\ A_t = B_t(1 - \gamma_p(\theta)) \end{cases} \quad 2.6$$

Où A_t ($0 \leq A_t \leq 1$) définit la contribution de la température de chaque couche (sol, végétation) en se basant sur la transmissivité de la végétation γ_p .

Dans le modèle $\tau - \omega$, les paramètres ω_p et τ_p sont souvent estimées à partir d'un processus d'optimisation en utilisant des mesures in situ. Dès lors, selon les conditions du couvert observé (architecture, contenu en eau) et les paramètres d'observation du capteur, les valeurs de ces deux paramètres peuvent varier d'un couvert à un autre. L'utilisation de ce modèle pour l'estimation de l'HS est relativement simple, mais présente des défis quant aux valeurs à donner à ces deux paramètres (ω_p , τ_p) entre autres.

L'application de ce modèle sur des sols couverts de forêts est toutefois remise en cause du fait que les diffusions multiples prenant place dans ce type de canopée n'y sont pas modélisées. Des diffusions d'ordre 1 doivent être considérées (Kurum *et al.*, 2012b) dans les milieux forestiers.

D'autres modèles de TR, plus appropriés pour ce type de canopée, basés sur l'approche discrète ont été développés afin de pallier les limitations du modèle $\tau - \omega$ et considérer les diffusions multiples. Ces dernières sont calculées par plusieurs méthodes : méthode de dédoublement de matrices (Ferrazzoli et Guerreiro, 1996), méthode de résolution exacte des équations de Maxwell (Tsang *et al.*, 1985) et méthodes itératives (Karam, 1997; Kurum *et al.*, 2011).

2.1.2. Généralités sur les modèles de transfert radiatif basés sur l'approche discrète

À une échelle spatiale réduite, les approches basées sur des modélisations physiques sont plus appropriées pour l'analyse et la compréhension du type de phénomène physique (absorption, diffusion) généré par chaque élément de la canopée forestière (troncs, branches, feuilles ou aiguilles). Avec des modèles basés sur la théorie du TR, considérant la canopée forestière comme un milieu discret, les processus de diffusion et d'absorption peuvent être caractérisés.

Dans l'approche discrète, la couche de végétation est considérée comme un ensemble de diffuseurs discrets (Kurum *et al.*, 2011). Ces diffuseurs discrets sont les éléments de la canopée végétale. Par exemple, il peut s'agir de feuilles et/ou tiges pour de la végétation agricole. Dans le cas d'une forêt, il s'agit des branches, des troncs, des feuilles pour le cas de feuillus ou d'aiguilles dans le cas de conifères.

Si ces éléments sont caractérisés en termes de formes géométriques, dimensions, densité statistique, et contenu en eau, leurs propriétés d'extinction (diffusion, absorption) peuvent être calculées à partir d'approximations électromagnétiques. Pour les éléments à structure cylindrique (branches, troncs et aiguilles), l'approximation de cylindres diélectriques à longueur finie (en anglais: finite-length dielectric cylinder) est utilisée (Karam *et al.*, 1988; Seker et Schneider, 1988). Pour les feuilles, l'approximation de disques diélectriques fins (en anglais: thin dielectric discs) est utilisée (Le Vine *et al.*, 1983; Le Vine *et al.*, 1985). Quelques modèles basés sur l'approche discrète pour la simulation des TB des milieux forestiers sont résumés ci-après.

Le modèle développé par Ferrazzoli et Guerriero (1996) différencie deux couches dans la canopée, à savoir la couronne des arbres (feuilles et / ou aiguilles, branches) et les troncs. Ce modèle prend en considération les diffusions multiples associées à la diffusion de volume dans la couronne de la canopée forestière et les interactions entre les différentes couches de cette canopée et la surface du sol. Le modèle calcule l'émissivité à partir du calcul du coefficient de diffusion bistatique global de la forêt, combiné au théorème de la conservation d'énergie. Il a été validé sur plusieurs types de couvert végétal, y compris un couvert forestier. Il a été amélioré pour prendre en considération le sous-bois, à travers une

modélisation physique (Ferrazzoli *et al.*, 2002), et la litière (Della Vecchia *et al.*, 2007). Rahmoune *et al.* (2013) avaient intégré la litière et le sous-bois dans le modèle de Ferrazzoli et Guerriero (1996). Le sous-bois a été modélisé empiriquement en l'intégrant dans le calcul de l'épaisseur optique. Pour considérer la litière, la modélisation de Della Vecchia *et al.* (2007) a été adoptée.

Karam (1997) a modélisé la végétation comme un milieu aléatoire multicouche au-dessus d'un sol rugueux. Ce modèle est basé sur une solution itérative des équations de TR en utilisant l'albédo de simple diffusion comme paramètre de petite perturbation. Le modèle a été validé sur des données expérimentales acquises sur des champs de maïs et de soja. Il a été utilisé également pour la simulation des températures de brillance d'une canopée de noyers (Karam, 1997).

Lang *et al.* (2001, 2006) avaient utilisé une approche de diffusion discrète modélisant les aiguilles, les branches et les troncs pour simuler l'émissivité d'une forêt de conifères. L'émissivité est obtenue en deux étapes. Premièrement, le coefficient de diffusion bistatique global de la forêt est calculé par l'approximation distordue de Born (Lang *et al.*, 1981). Deuxièmement, en utilisant la formule d'émissivité de Peake (Peake, 1959), reliant la mesure micro-onde passive et active, l'émissivité est calculée en intégrant le coefficient de diffusion bistatique sur l'hémisphère supérieur (au-dessus de la canopée) (Lang *et al.*, 1989).

Parmi les modèles cités précédemment, le modèle de Ferrazzoli et Guerriero (1996) a relativement été plus utilisé pour la simulation des TB sur des canopées forestières. Il a été testé et validé avec des jeux de données *in situ* et aéroporté (Rahmoune *et al.*, 2013). Le rmse des simulations est dans la plage 2.5 K - 4.0 K (Della Vecchia *et al.*, 2007).

Plus, récemment, Kurum *et al.* (2011) ont développé un modèle qui prend en considération les diffusions de premier ordre en bande L. Le modèle a été validé avec des données acquises sur une forêt de feuillus (Kurum *et al.*, 2011). Il a été par la suite adapté aux forêts de conifères (Kurum *et al.*, 2012a) en prenant en considérant la litière dans un modèle de sol multi couches (sol minéral- humus – litière). Comme pour le modèle de Karam (1997), le modèle de Kurum *et al.* (2011) est basé sur une solution itérative des équations

de TR en implémentant la méthode des ordres successifs de diffusion de Lenoble (1985). L'accent sera mis sur ce modèle dans la section 2.1.3. Ses avantages relativement aux autres modèles seront mis en exergue.

2.1.3. Exemple du modèle de Kurum *et al.* (2011) basé sur l'approche discrète

Ce modèle a pour objectif la modification du modèle $\tau - \omega$ (section 2.1.1) dans le but de prendre en considération la diffusion multiple de la canopée forestière. Le modèle de Kurum *et al.* (2011) est construit à partir du schéma synoptique de la figure 2.2. Par hypothèse, les températures du sol et de la végétation sont considérées identiques (Kurum *et al.*, 2011). Les éléments constituant la canopée (branches, troncs, feuilles) sont considérés statistiquement uniformément répartis. Tous les détails sur la solution d'ordre 0 et d'ordre 1 des équations de TR sont fournis dans Kurum *et al.* (2011).

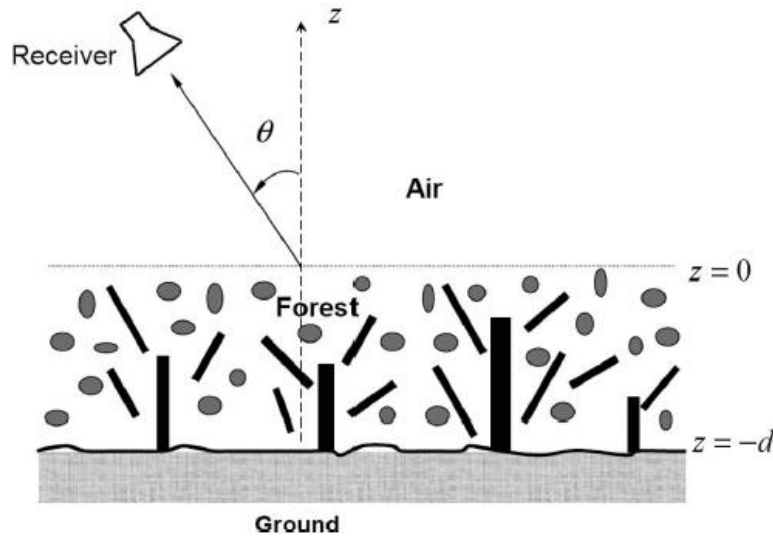


Figure 2.2. Schéma synoptique de l'émission de la forêt au-dessus d'un sol rugueux (Kurum *et al.*, 2011)

La solution d'ordre 0 de diffusion simplifiée, exprimée en termes d'émissivité (e_p), est donnée par l'équation 2.7 (Kurum *et al.*, 2012b). Elle sera dénommée dans ce document solution K0. Elle est obtenue en considérant la diffusion négligeable à travers la mise à zéro de la fonction source de diffusion dans les équations de TR. La solution d'ordre 1 est donnée par l'équation 2.8. Cette solution sera notée solution K1.

$$e_p^{(0)}(\theta) = [1 - \gamma_p^2(\theta)R_p(\theta)] - \omega_p(\theta)[1 + \gamma_p(\theta)R_p(\theta)][1 - \gamma_p(\theta)] \quad 2.7$$

$$e_p^{(1)}(\theta) = e_p^{(0)}(\theta) + \Omega_p(\theta) \quad 2.8$$

La solution K1 est obtenue par un processus itératif basé sur la méthode des ordres successifs de diffusion de Lenoble *et al.* (2007). Dans les équations de TR de la solution K1, la fonction source de diffusion est remplacée par l'équation de la solution K0 (Kurum *et al.*, 2011). L'ordre 1 de diffusion fait référence à l'ordre 1 de diffusion dans la fonction source de diffusion. Dans la solution K1, l'ordre 1 de diffusion indique que l'émission du sol et celle de la végétation sont diffusées une fois par les diffuseurs de la couche de végétation (Kurum *et al.*, 2011).

L'albédo de simple diffusion composite (présence de plusieurs types de diffuseurs) ω_p et l'épaisseur optique τ_p sont calculés théoriquement à partir des mesures faites sur les éléments de la canopée (branches, feuilles, troncs): dimension, orientation, densité et constante diélectrique. ω_p est donné par l'équation 2.9 (Tsang *et al.*, 1985).

$$\omega_p(\theta) = 1 - \frac{K_{ap}(\theta)}{K_{ep}(\theta)} = \int_{4\pi} d\Omega' \sum_{q=H,V} F_{pq}(\theta, \varphi; \theta', \varphi') / K_{ep}(\theta) \quad 2.9$$

$F_{pq}(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ est la fonction de phase collective par unité de volume donnée par l'équation 2.10. $d\Omega' = d\varphi' d\theta' \sin \theta'$ est l'angle solide .

$$F_{pq}(\theta, \varphi; \theta', \varphi') = \sum_{\alpha} \rho_{\alpha} \langle |f_{pq}^{(\alpha)}(\theta, \varphi, \theta', \varphi')|^2 \rangle \quad 2.10$$

$f_{pq}^{(\alpha)}(\theta, \varphi, \theta', \varphi')$ et ρ_{α} sont respectivement l'amplitude bistatique de diffusion et la densité du groupe de diffuseurs α . Cette fonction décrit les propriétés de diffusion de la direction (θ', φ') vers la direction incidente (θ, φ) . Le coefficient d'extinction K_{ep} est

donné par l'équation 2.11 (Tsang *et al.*, 1985).

$$K_{ep}(\theta) = \left(\frac{4\pi}{k}\right) \cdot \sum_{\alpha} \rho_{\alpha} \cdot Im\{\langle f_{fpp}^{(\alpha)} \rangle\} \quad 2.11$$

$Im\langle f_{fpp}^{(\alpha)} \rangle$ est la partie complexe de l'amplitude de diffusion vers l'avant (en anglais: forward scattering amplitude) du groupe de diffuseur α . Ce dernier peut être une feuille, une branche ou un tronc. k est le nombre d'onde. La somme est faite sur tous les éléments (branches, feuilles, troncs) de la canopée. Le symbole $\langle . \rangle$ indique la moyenne des statistiques sur l'angle et la taille des diffuseurs.

La solution K0 (équation 2.7) permet de mettre en exergue l'effet de l'albédo de simple diffusion ω_p sur la réduction de l'émissivité $e_p^{(0)}$. Le terme Ω_p dans la solution K1 modélise les diffusions de premier ordre intervenant dans le milieu forestier et permet d'équilibrer la réduction de l'émissivité due à ω_p dans la solution K0 (2^e terme de l'équation 2.7). Connaissant la hauteur de la canopée et l'angle d'incidence du capteur, l'épaisseur optique τ_p est calculée en utilisant les équations 2.4 et 2.11.

La solution K1 (équation 2.8) peut être reformulée selon l'équation 2.12 (Kurum *et al.*, 2012b):

$$e_p^{(1)}(\theta) = [1 - \gamma_p^2(\theta)R_{sp}(\theta)] - \omega_p^*(\theta)[1 + \gamma_p(\theta)R_{sp}(\theta)][1 - \gamma_p(\theta)] \quad 2.12$$

Avec:

$$\omega_p^*(\theta) = \omega_p(\theta) - \frac{\Omega_p(\theta)}{[1 + \gamma_p(\theta)R_{sp}(\theta)][1 - \gamma_p(\theta)]} \quad 2.13$$

Comparé à l'albédo $\omega_p(\theta)$, qui représente les propriétés de diffusion simple des éléments de la canopée, ω_p^* du modèle de diffusion d'ordre 1 est un albédo effectif prenant en considération tous les processus se produisant dans un milieu forestier. C'est un albédo

effectif qui approcherait la diffusion réelle d'un milieu forestier. Le paramètre $\Omega_p(\theta)$ correspond à la diffusion de premier ordre. Il représente l'émission du sol et l'émission de la couche de la végétation qui est diffusée une fois par les feuilles, les branches et les troncs. $\Omega_p(\theta)$ comprend quatre différents mécanismes de diffusion dont l'énergie est reçue par le radiomètre soit directement, noté $s1$, ou par réflexion au sol notée $sr1$, donnant ainsi huit termes de diffusion. Les quatre différents mécanismes de diffusion sont illustrés dans la figure 2.3 (Kurum *et al.*, 2011).

Le solution K1 (équation 2.8) est une modification du modèle $\tau - \omega$ pour prendre en considération la diffusion d'ordre 1 d'une canopée forestière. En faisant une comparaison entre la solution K0 (équation 2.7) et celle modifiée (2.12), les deux diffèrent uniquement par l'albédo utilisé. Il faut noter que la formulation physique de l'épaisseur optique est la même dans la solution K0 et dans la solution K1. Aussi, la solution K1 garde la simplicité du modèle $\tau - \omega$. Vu les avantages que présente la solution K1, il a été choisi pour nos objectifs de modélisation des couverts forestiers étudiés.

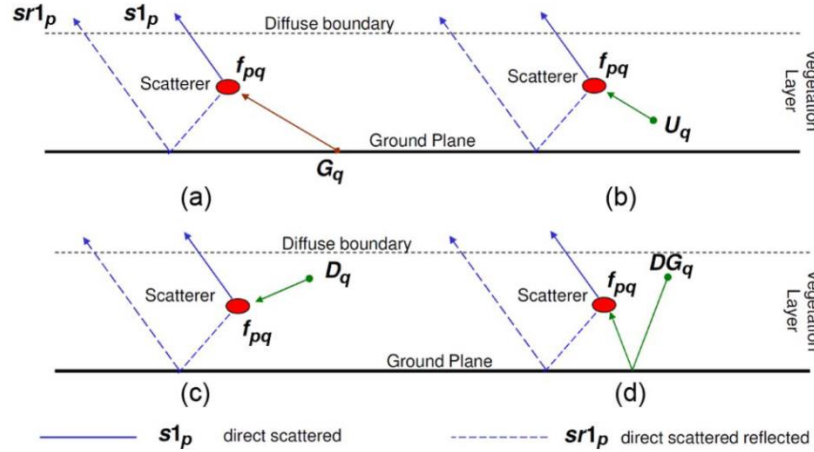


Figure 2.3. Illustration des différents mécanismes de diffusion en bande L composant le paramètre $\Omega_p(\theta)$. (a) : diffusion de l'émission du sol, (b) : diffusion de l'émission ascendante de la végétation, (c): diffusion de l'émission descendante de la végétation, (d): émission descendante de la végétation réfléchiée par le sol (Kurum *et al.*, 2011).

2.1.4. Caractérisation de l'émissivité des composantes d'une canopée forestière

Ferrazzoli et Guerriero (1996) ont fait des simulations de l'émission de forêts de feuillus (figure 2.5) et de conifères (figure 2.4) en fonction de leur biomasse, de la fréquence (L, C,

X) et des angles d'incidence de 15° et de 45°. Les figures 2.4 et 2.5 montrent qu'en absence de feuilles ou d'aiguilles, l'émissivité augmente avec l'augmentation de la biomasse sèche à l'exception de l'émissivité en bande L de forêts de conifères qui se sature à une biomasse de $\sim 120 \text{ tonnes/ha}$. En présence de feuilles ou d'aiguilles, deux aspects sont à noter. Premièrement, l'émissivité en bande C et en bande X de forêts de conifères atteint plus rapidement la saturation par rapport à l'émissivité de forêts de feuillus. Deuxièmement, pour les trois fréquences (L, C, X), et pour une biomasse sèche donnée, l'émissivité des forêts de conifères augmente beaucoup plus en présence d'aiguilles que celle des forêts de feuillus en présence de feuilles. Cette propriété peut être exploitée dans un processus de classification des forêts (Ferrazzoli et Guerriero, 1996).

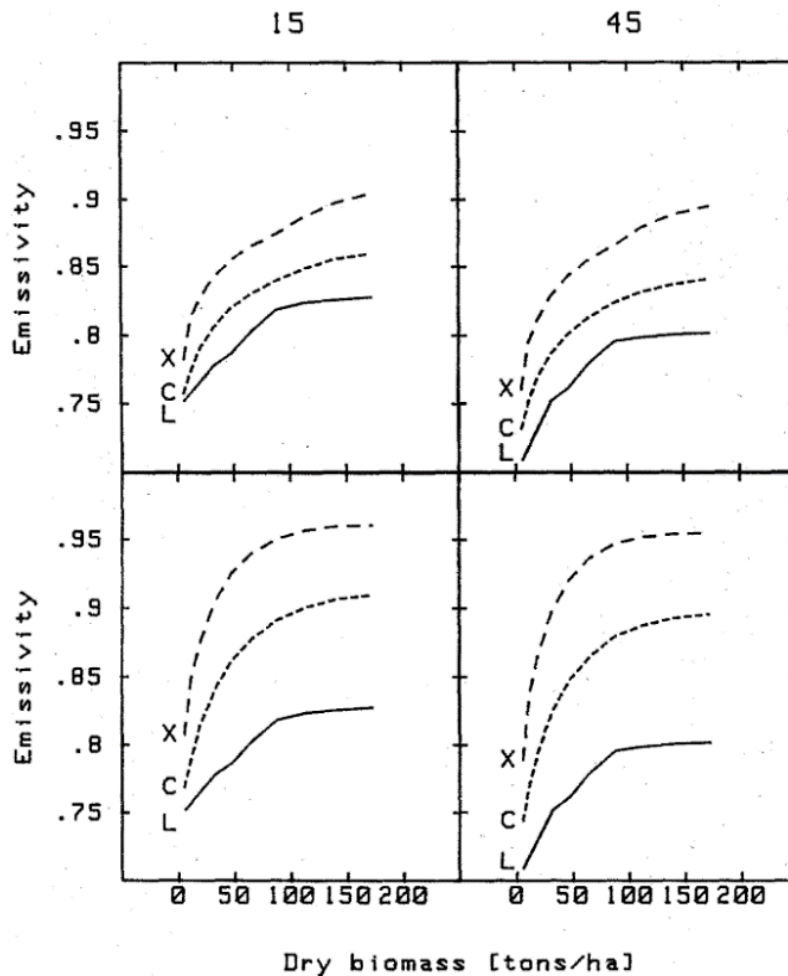


Figure 2.4. Variations de l'émissivité en polarisation H d'une forêt de conifères dépourvus d'aiguilles (panneau haut) et avec aiguilles (panneau bas) en fonction de la biomasse sèche, de la fréquence (L, C, X) et de l'angle d'incidence (15°: panneau de gauche, 45°: panneau de droite). (P. Ferrazzoli et Guerriero, 1996)

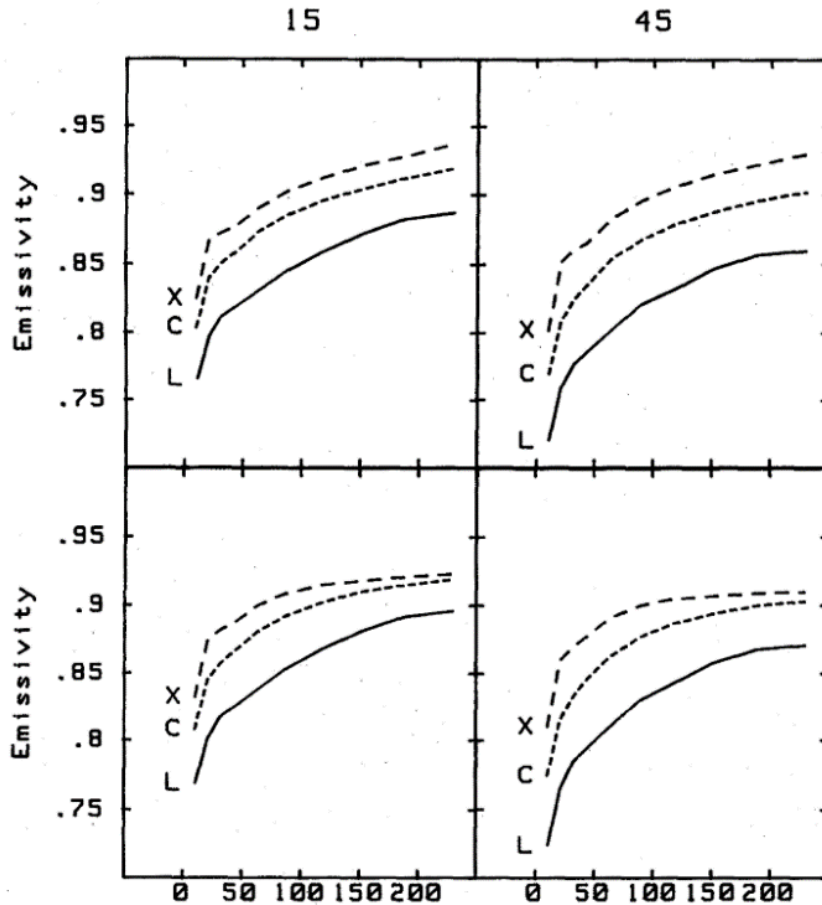


Figure 2.5. Variations de l'émissivité en polarisation H d'une forêt de feuillus dépourvus de feuilles (panneau haut) et avec feuilles (panneau bas) en fonction de la biomasse sèche, de la fréquence (L, C, X) et de l'angle d'incidence (15°: panneau de gauche, 45°: panneau de droite). (P. Ferrazzoli et Guerriero, 1996)

Aussi, un aspect important a été révélé par cette étude. Il concerne la contribution des différents éléments (troncs, branches, feuille) de la canopée à l'atténuation totale de la canopée. Des simulations d'émissivité, pour des fréquences de 1 à 10 GHz et pour deux angles d'incidence (15° et 45°), ont été réalisées pour une forêt de feuillus d'une biomasse sèche de 240 tonnes/ha. Le processus d'atténuation dû aux branches est dépendant de la fréquence. De plus, les branches sont les éléments qui contribuent majoritairement à ce processus. En bande L, les troncs et les feuilles ont une contribution minoritaire au processus d'atténuation globale du signal.

Ces résultats sont appuyés par des résultats similaires obtenus en simulant l'émissivité et

la transmissivité en bande L des éléments d'une forêt de conifères en fonction de l'âge des arbres et avec un angle d'incidence de 35° (Ferrazzoli *et al.*, 2002). La figure 2.6 illustre ces résultats. Les branches sont les éléments majoritairement responsables des processus d'atténuation et d'émission, alors que les troncs et les aiguilles ont une contribution minoritaire dans ces deux processus.

Les branches et les troncs sont modélisés par des cylindres, mais avec des paramètres différents tels que les dimensions, les densités, l'orientation et le contenu en eau. Les troncs provoquent une diffusion vers l'avant (direction incidente) de sorte que l'extinction du signal par les troncs est due au processus d'absorption (Ferrazzoli *et al.*, 2002). Le processus d'absorption augmente avec l'augmentation de la taille (ratio : $\frac{\text{diamètre}}{\text{longueur d'onde}}$) des troncs (Ferrazzoli et Guerriero, 1996). Néanmoins, les troncs ont une densité faible et leur nombre diminue avec l'âge de la forêt de sorte que l'atténuation et l'émissivité dues aux troncs est faible et diminuent faiblement avec l'âge de la forêt (Ferrazzoli et Guerriero, 1996).

Pour ce qui est des branches, ils ont une densité plus élevée que celle des troncs et ont des orientations et des dimensions différentes. Ceci favorise une diffusion dans toutes les directions (Ferrazzoli et Guerriero, 1996). Les branches se trouvant dans la partie supérieure de la couronne vont diffuser le signal vers les branches situées dans la partie inférieure de la couronne, ce qui fait augmenter l'absorption et par conséquent l'émission (Ferrazzoli et Guerriero, 1996). Ce phénomène s'accroît avec l'augmentation de l'épaisseur de la couronne des arbres, c'est-à-dire avec l'âge de la forêt, ce qui a pour conséquence la diminution de la transmissivité des branches (Ferrazzoli et Guerriero, 1996).

Concernant les aiguilles, leur absorption et leur diffusion sont respectivement proportionnelles à $\frac{V}{\lambda}$ et à $\frac{V^2}{\lambda^4}$ (Ferrazzoli et Guerriero, 1996). V est le volume du diffuseur et λ la longueur d'onde considérée. En bande L, pour les aiguilles, la diffusion est négligeable où elles jouent principalement le rôle d'éléments absorbeurs produisant un effet minimal. Le processus d'extinction associé aux aiguilles est dû à leur orientation aléatoire (Ferrazzoli et Guerriero, 1996).

Considérant le résultat précédent, il est opportun d'étudier le comportement des branches selon leurs tailles. Pour y arriver, une étude quantitative faite par Macelloni *et al.* (2001), avec un modèle de TR basé sur l'approche discrète qui considère la canopée forestière comme étant constituée de 2 couches (les troncs et la couronne), avait mis en exergue la contribution en bande L des branches selon leurs tailles.

Avec des données expérimentales d'une canopée de chêne, dont les branches avaient été séparées selon leurs dimensions, les simulations avaient montré deux aspects importants relativement à la contribution des différentes composantes de la canopée à l'émission globale du milieu forestier (figure 2.7).

Premièrement, les troncs contribuent très peu à l'émission globale, alors que la couronne des arbres y contribue majoritairement. Deuxièmement, parmi les éléments de la couronne, ce sont les branches de taille importante et moyenne qui apportent la contribution importante à l'émission (voir figure 2.7).

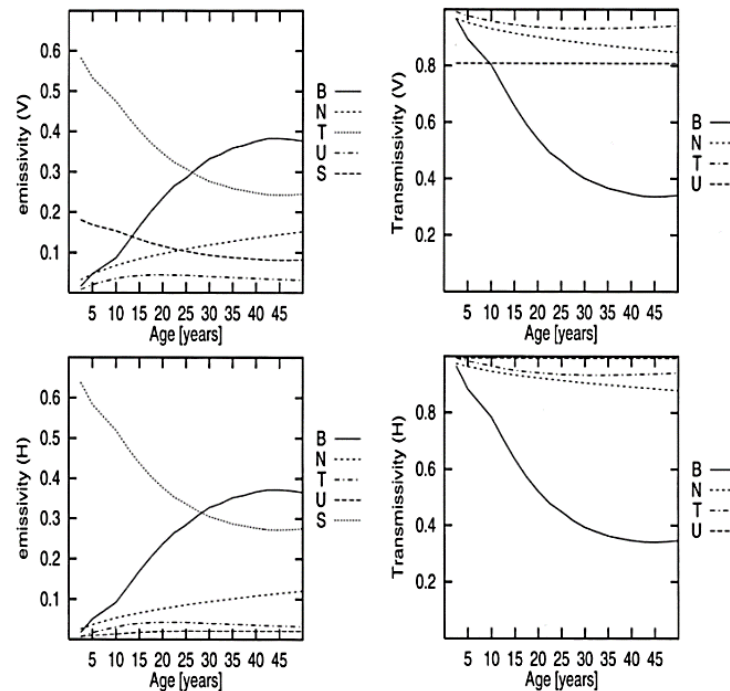


Figure 2.6. Simulation de l'émissivité et de la transmittance en bande L et à un angle d'incidence de 35° des éléments d'une canopée de conifères en fonction de l'âge de la canopée. B: branches, N: aiguilles, U: sous-bois, S : sol, T : troncs (Ferrazzoli *et al.*, 2002).

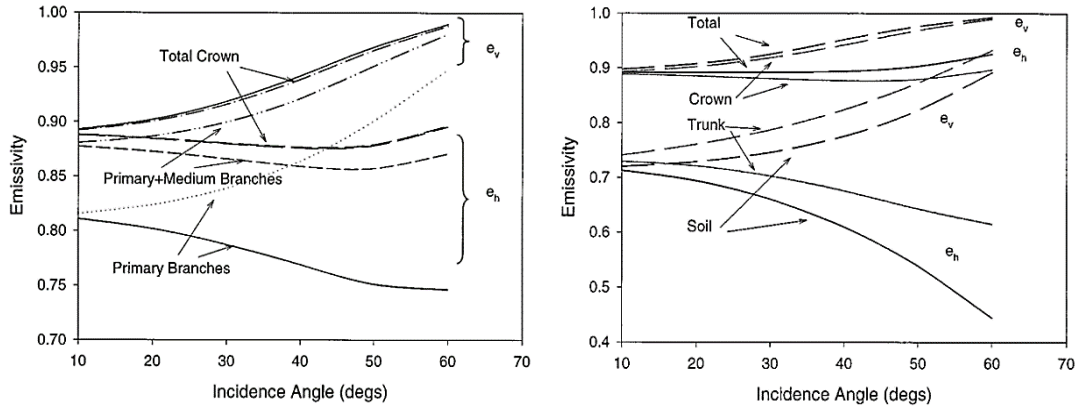


Figure 2.7. Contribution des différentes couches d'une canopée de feuillus en bande L et à un angle de 30° et discrimination de la contribution des branches primaires et secondaires. (Macelloni *et al.*, 2001)

En outre, en bande L, la contribution des feuilles est considérée minimale (Macelloni *et al.*, 2001).

Ces conclusions ont été confirmées avec des observations faites à l'aide d'un radiomètre, à partir du sol forestier et faisant des mesures vers la couronne des arbres, pour différentes conditions de foliation (Guglielmetti *et al.*, 2007). Ainsi, les contributions venant des troncs, des branches et des feuilles sont intégrées par le radiomètre. Ces mesures ont permis d'estimer les transmissivités γ_p (p pour polarisation H ou V) de la canopée forestière selon son état de foliation. Les transmissivités estimées γ_V étaient supérieures à γ_H . Ceci laisse supposer que les troncs ne sont pas les éléments absorbeurs. Aussi, une augmentation très marginale a été remarquée entre les transmissivités estimées en pleine période de foliation et celles estimées quand les arbres étaient dénués de feuilles. Ces deux premiers constats suggèrent que parmi les éléments de la canopée, les branches seraient les éléments responsables de l'atténuation et de l'émission d'une canopée forestière de feuillus en bande L.

2.1.5. Caractérisation de l'effet du sous-bois

Par la couche de sous-bois, nous entendons toute couverture végétale du sol forestier, peu importe sa nature (herbe, végétation basse, petits arbres, etc.). Les arbres dont le Diamètre à Hauteur Poitrine (DHP) est inférieur à 2,54 cm (1 pouce) sont considérés comme étant

du sous-bois.

En milieu forestier, au-delà des effets induits par la biomasse de la forêt (les arbres) et la couche de litière sur l'estimation de l'HS, il y a également la couche de sous-bois qu'il faut prendre en considération. Son effet sur l'émission, la rétrodiffusion du milieu forestier ainsi que l'estimation de l'HS a été très peu exploré. Nous allons citer les rares travaux l'ayant abordé.

Dans le domaine des microondes actives, Le Toan *et al.* (1992) avaient suggéré que le sous-bois pouvait avoir un effet considérable sur la rétrodiffusion globale de la forêt. Cet effet dépend pour une forêt donnée du niveau de croissance des arbres et des paramètres du capteur radar, tels que l'angle d'incidence, la polarisation et surtout la fréquence. Silva et Dias (1996) avaient modélisé le sous-bois comme une couche constituée d'éléments discrets (tige, branches, feuilles) et l'avaient intégré dans le modèle de rétrodiffusion MIMICS (Ulaby *et al.*, 1990). Ils ont étudié l'effet du sous-bois à travers des simulations utilisant des données collectées sur une forêt de feuillus (faux tremble) et une forêt de conifères (pin maritime portugais). Ces simulations sont effectuées pour plusieurs fréquences (L, C, X) radar et à un angle d'incidence de 30° (Silva et Dias, 1996). En bande L, le sous-bois atténue les termes d'interaction troncs-sol et sol-tronc et cet effet augmente avec l'augmentation de la biomasse et la hauteur du sous-bois. Comme conséquences, cet effet peut dégrader la qualité de l'estimation des paramètres de la forêt tels que la biomasse, le LAI, le DHP, la surface basale et la hauteur des arbres. Pour les bandes C et X, la contribution du sous-bois à la rétrodiffusion totale de la forêt devient importante et ce pour toutes les polarisations (Silva et Dias, 1996). Ce résultat paraît improbable vu l'atténuation importante que subit le signal en bandes C et X dans la couronne des arbres.

Dans le domaine des MOP en bande L, qui est notre champ d'intérêt, Ferrazzoli *et al.* (2002) avaient intégré une couche de sous-bois d'une forêt de conifères dans le modèle de Ferrazzoli et Guerriero (1996). Cette couche a été prise en compte à travers une modélisation physique en considérant un nombre donné de tiges cylindriques, d'une hauteur définie, par unité de surface. L'effet du sous-bois est plus important pour des forêts jeunes (20 ans) où il introduit un effet dépolarisant à cause de la diffusion de volume

(Ferrazzoli *et al.*, 2002). En polarisation H, l'émissivité de la forêt est insensible à la présence du sous-bois. En polarisation V, sa présence fait augmenter légèrement l'émissivité et la sensibilité à la biomasse est réduite (Ferrazzoli *et al.*, 2002).

2.2. Modélisation en micro-ondes passives de sols forestiers

2.2.1. Impact des couches organiques sur l'émission du sol : litière et humus

Les études ayant porté sur la problématique posée par la couche de litière dans le processus de l'estimation de l'HS ainsi que la connaissance de ses propriétés radiatives sont relativement récentes. Aussi, les observations *in situ* pour la caractérisation et la compréhension des propriétés radiatives des couches de litière et de sol organique sont très limitées (Kurum *et al.*, 2012). Nous allons nous concentrer sur des travaux ayant fait des observations en bande L.

Avec des observations sur des sites agricoles, Schmugge *et al.* (1988) et Jackson (1991) ont mis en évidence l'effet de l'accumulation d'une couche de chaume au-dessus du sol minéral sur les TB mesurées. La présence de cette couche en conditions humides avait causé une augmentation des TB mesurées par rapport à celles mesurées sur d'autres sites agricoles où cette couche n'était pas présente. Plus tard, Saleh *et al.* (2007) ont confirmé ces observations sur des terrains couverts d'herbe en présence de couche de litière. L'interception des précipitations par cette couche détériore la qualité de l'estimation de l'HS par rapport à celle obtenue durant les périodes sèches.

Grant *et al.* (2007) ont fait des mesures angulaires ($25^\circ - 60^\circ$) avec un radiomètre fonctionnant en bande L sur une tour d'une hauteur de 40 m pour observer une forêt de conifères avec une couche de litière recouvrant le sol minéral. Les mesures continues faites pendant 6 mois, de contenu en eau de ces deux couches, avaient révélé une corrélation importante ($r^2 = 0,84$) entre ces deux paramètres. Ceci complique le découplage de la contribution de chacune de ces deux couches. D'autres aspects intéressants ont été révélés par les mesures de Grant *et al.* (2007). D'un côté, les variations des contenus en eau de la couche de litière et du sol minéral sont détectables par les mesures angulaires acquises. Ainsi, à titre d'exemple, une transmissivité de 42 % a été estimée à un angle d'incidence

de 45°, ce qui indique une semi-transparente en bande L de la canopée forestière. D'un autre côté, la faible plage de variation des émissivités observées relativement à la variation de l'HS rend inexploitable les mesures faites pour l'estimation de l'HS.

En exploitant les données (mesures au-dessus de la canopée) acquises à un angle d'incidence de 45° du jeu de données utilisé dans les travaux présentés précédemment, et avec une modélisation différente de l'émissivité du sol forestier (litière et sol minéral), Della Vecchia *et al.* (2007) ont montré que la couche de litière a une contribution importante à l'émissivité observée au-dessus de la forêt. Des erreurs de simulations de l'ordre de 3 K ont été obtenues en prenant en compte la couche de litière dans les simulations. Sans la prise en compte de cette couche, les erreurs de simulation devenaient importantes, de l'ordre de 18 K.

Pour une compréhension plus approfondie des propriétés radiatives en bande L de la litière de feuillus, Schwank *et al.* (2008) ont fait des mesures radiométriques à un angle d'incidence de 50° d'une couche de litière, composée de feuilles mortes, préparée spécialement dont le contenu en eau était un paramètre contrôlable par arrosage. Un modèle physique simulant les TB observées a été développé. Des analyses ont été faites selon le contenu en eau et l'épaisseur de la couche de litière, et les rugosités caractérisant les interfaces litière-sol minéral et air-litière. Globalement, les simulations du modèle étaient en accord avec les observations du radiomètre. Dans des conditions sèches, la couche de litière est presque transparente, alors qu'en conditions humides, elle devient une source d'émission. Cette expérience a mis le doigt sur un aspect important. Juste après avoir arrosé la couche de litière, une augmentation des TB a été observée. Après ce premier constat, si cette couche est arrosée davantage, les TB diminuent. Ceci est dû à l'augmentation de l'HS minéral suite à l'infiltration de l'eau à travers la couche de litière une fois celle-ci saturée.

Grant *et al.* (2009) ont été les premiers à faire des mesures in situ, avec différentes configurations d'observation et dans une large plage d'angle d'incidence, sous la canopée forestière, sur le même site forestier de conifère des travaux entrepris par Grant *et al.* (2007). L'objectif de l'étude était le découplage des contributions des différentes couches du milieu forestier intervenant dans la solution d'ordre zéro des équations de TR. Le sol

minéral est couvert de litière et d'herbes. Des observations sont faites en enlevant les couches du sol forestier une après l'autre. Les résultats obtenus par cette étude sont combinés avec ceux de la première étude (Grant *et al.*, 2007) pour tirer quelques conclusions. En conditions humides, la couche d'herbe et la couche de litière recouvrant le sol minéral sont des sources d'émission. Plus précisément, une partie importante de l'émission du sol forestier (sol minéral, litière, herbe) provient de ces deux couches. En conditions sèches, le signal observé est expliqué par les variations de l'HS minéral. Les observations ont montré que l'ajout uniquement de couches humides de litière et d'herbe au-dessus du sol minéral réduit substantiellement la sensibilité du radiomètre à l'HS. Selon les auteurs, ceci expliquait le fait que les observations faites au-dessus de la canopée soient insensibles à la variation de l'HS, en dépit d'une canopée forestière semi-transparente d'après les transmissivités estimées à partir des observations faites.

Sur des sites forestiers, à travers le temps, il peut y avoir la formation d'une couche de sol organique (humus) sur le sol minéral suite à la décomposition de matières organiques (branches mortes, litière, etc.). En présence de cette couche et de la couche de litière, il est important de comprendre le comportement radiatif de ce sol multi couches sur l'émission du sol forestier. Connaissant l'épaisseur et le contenu en eau de ces deux couches, Kurum *et al.* (2012a) ont intégré un modèle de réflectivité trois-couche (sol minéral, humus et litière) de sol forestier dans la solution d'ordre 1 des équations de TR du modèle développé par Kurum *et al.* (2011). Des observations ont été faites au-dessus de deux sites forestiers de conifères adjacents présentant les mêmes caractéristiques. Sur un des deux sites, la couche de litière a été enlevée. L'autre site est pris comme un site témoin (litière présente). L'objectif était de comparer les TB observées après l'enlèvement de la couche de litière sur le premier site avec les TB observées sur le site témoin. La comparaison des TB des deux sites avait révélé que l'enlèvement de la couche de litière avait provoqué une diminution des TB. Les simulations ont aussi décelé cette diminution. La longue période d'observation avait montré que l'impact de cette couche est plus important quand elle est humide et est négligeable en conditions sèches. Concernant l'impact de la couche organique, les simulations avaient montré que la couche d'humus est aussi une source d'émission. Pendant toute la période d'observation, une sensibilité très limitée de TB à l'HS a été observée même si l'HS avait varié entre 0,05 à $0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

2.2.2. Modélisation de l'émission d'un sol forestier monocouche

La TB d'un sol constitué uniquement d'un sol minéral est donnée par l'équation 2.14 (Ulaby *et al.*, 1986). e_p est l'émissivité du sol minéral.

$$Tb_p(\theta) = e_p(\theta)T_s = (1 - R_p(\theta))T_s \quad 2.14$$

T_s est la température physique effective du sol minéral (équation 2.5). θ est l'angle d'incidence. R_p est la réflectivité du sol forestier corrigée des effets de la rugosité (Ulaby *et al.*, 1986). R_p peut être calculée en utilisant les formules de la réflectivité de Fresnel (r_h, r_v) pour les deux polarisations H (équation 2.15) et V (équation 2.16). ε est la constante diélectrique du sol minéral. Celle-ci peut être estimée avec des modèles diélectriques (Dobson *et al.*, 1985; Mironov, 2004; Mironov *et al.*, 2009).

$$R_H(p, \theta) = r_h e^{-h(\cos \theta)^2} = \left| \frac{\cos \theta - \sqrt{\varepsilon - (\sin \theta)^2}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - (\sin \theta)^2}} \right|^2 e^{-h(\cos \theta)^2} \quad 2.15$$

$$R_V(p, \theta) = r_v e^{-h(\cos \theta)^2} = \left| \frac{\varepsilon \cos \theta - \sqrt{\varepsilon - (\sin \theta)^2}}{\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - (\sin \theta)^2}} \right|^2 e^{-h(\cos \theta)^2} \quad 2.16$$

Le terme $e^{-h(\cos \theta)^2}$ est introduit pour prendre en considération l'effet de la rugosité du sol à travers le paramètre h et l'effet de l'angle d'incidence (Choudhury *et al.*, 1979). Ceci dans le but de comparer des simulations avec des observations (bande L) faites sur un sol rugueux à un seul angle d'incidence et pour différentes valeurs d'HS. Le paramètre h , donné par l'équation 2.17, est exprimé en fonction d'un paramètre de rugosité du sol, à savoir l'écart-type des hauteurs σ , et du nombre d'onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ étant la longueur d'onde.

Où

$$h = 4k^2\sigma^2 \quad 2.17$$

En prenant le paramètre h comme paramètre effectif de rugosité (h') au lieu de la formulation physique de l'équation 2.17, les erreurs de simulations avaient été réduites (Choudhury *et al.*, 1979). Les valeurs effectives de h (h') ayant permis d'atteindre ce résultat sont inférieures aux valeurs physiques calculées par l'équation 2.17. Le paramétrage du terme de rugosité avec un seul paramètre avait des limites, car son utilisation n'avait pas permis de faire des simulations satisfaisantes en comparaison avec des observations multi angulaires (Ulaby *et al.*, 1986). Par la suite, le modèle des équations 2.15 et 2.16 avait été amélioré en intégrant un deuxième paramètre, appelé paramètre de mélange de polarisation Q (en anglais: polarization-mixing parameter). Les équations 2.15 et 2.16 sont modifiées selon l'équation 2.18.

$$R_p(\theta, p) = [(1 - Q)r(\theta, p) + Qr(\theta, q)]e^{-h'(\cos \theta)^2} \quad 2.18$$

Où p and q représentent respectivement les polarisations H et V ou vice versa. Avec cette formulation à deux paramètres, il a été possible de faire des simulations satisfaisantes pour différentes conditions d'observations (Wang et Choudhury, 1981). Le fait de supprimer le terme $(\cos \theta)^2$ dans les équations 2.15 et 2.16 a engendré des erreurs de simulations appréciables en comparaison avec des mesures radiométriques faites avec un angle d'incidence compris entre 0 et 60° (Wang *et al.*, 1983). En bande L, l'impact du paramètre Q est minimal et peut être mis à zéro (Wang *et al.*, 1983). Selon le type de terrain observé et les paramètres du capteur utilisé (fréquence, angle d'incidence), plusieurs auteurs ont été amenés à modifier les équations 2.15 et 2.16 ou l'équation 2.18 pour avoir des simulations satisfaisantes. Dans le cadre de la mission SMAP, le paramètre effectif h' a été considéré indépendant de la polarisation (Chan *et al.*, 2016). Un rappel exhaustif de l'évolution du paramétrage des effets de la rugosité et de l'angle d'incidence sur l'émission du sol est présenté dans Wigneron *et al.* (2017).

Le sol d'une forêt boréale est généralement constitué de trois couches superposées : litière, humus, sol minéral. Comme décrit dans la section 2.2.1, l'effet de la couche de litière sur la réflectivité du sol, et par conséquent sur son émission, a été exploré ces dernières années par plusieurs travaux de recherche (Schwank *et al.*, 2008; Grant *et al.*, 2009; Kurum *et al.*,

2012a), ce qui n'est pas le cas pour la couche d'humus.

2.2.3. Modélisation de l'émission d'un sol forestier multicouches

Pour des milieux constitués de plusieurs couches et dépendamment des propriétés thermiques et diélectriques, des modèles cohérents (England, 1975; Tsang *et al.*, 1975; Wilheit, 1978) ou incohérents (Burke *et al.*, 1979; England, 1975) peuvent être utilisés pour calculer leurs réflectivités (Ulaby *et al.*, 1981). Ulaby *et al.* (1986) et Schmugge and Choudhury (1981) ont comparé des modèles cohérents et non cohérents d'émission du sol.

Les modèles non cohérents estiment l'émissivité en utilisant le contraste diélectrique à l'interface air-sol. Ils fournissent un bon résultat quand la profondeur de pénétration de l'onde électromagnétique est bien connue. Dans les modèles cohérents, la valeur de l'émissivité à la surface du sol est couplée avec les propriétés diélectriques des couches sous le sol. Par conséquent, les modèles cohérents fournissent une meilleure estimation de l'émissivité. Les modèles cohérents peuvent être utilisés si les profils diélectriques et les profils de températures dans chaque couche sont supposés uniformes (constants), ce qui veut dire qu'il n'y a pas de diffusion de volume dans chaque couche, et que les interfaces entre les couches sont distinctes (profils diélectriques discontinus à l'interface des deux couches), la réflectivité de ce milieu peut être calculée avec des modèles cohérents (Ulaby *et al.*, 1981). Les modèles cohérents sont aussi utilisés quand le profil diélectrique du sol est non uniforme et est continu au niveau des interfaces entre les couches du sol. Dans ces conditions, le modèle de Wilheit (1978) est mieux adapté et minimise l'effet des interférences (Lee *et al.*, 2002). Ce modèle prend aussi en considération le profil thermique du sol. Il a été adopté dans les travaux de Grant *et al.* (2009). Avec une modélisation empirique du profil diélectrique, d'autres modèles cohérents ont été utilisés par Kurum *et al.* (2012a), à savoir le modèle de Born and Wolf (1999), et le modèle de Bass *et al.* (1995) dans les travaux de Schwank *et al.* (2008). Dans Della Vecchia *et al.* (2007) et Rahmoune *et al.* (2013), la réflectivité globale du sol forestier trois couches (air, litière, sol minéral) a été calculée avec un modèle cohérent à multiples réflexions (Ulaby *et al.*, 1981). Comparé aux modèles cités précédemment, ce modèle est simple en termes de sa formulation physique.

Le modèle cohérent à multiples réflexions (Ulaby *et al.*, 1981) est construit à partir du schéma de la figure 2.8.

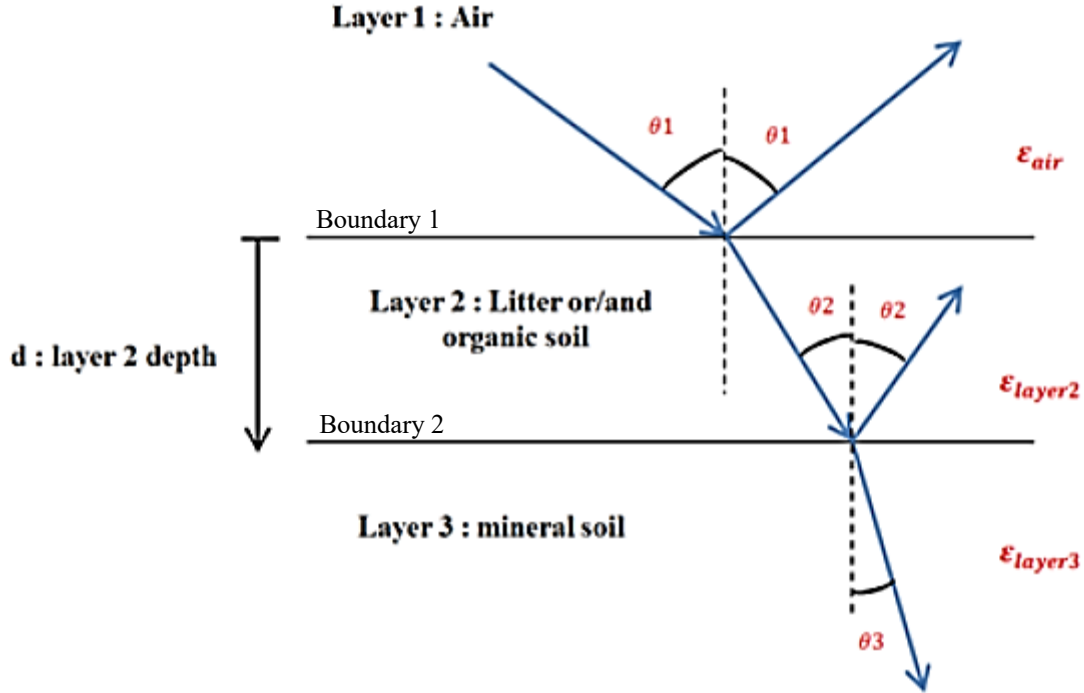


Figure 2.8. Géométrie de la dérivation du modèle cohérent de réflectivité 3 couches d'un sol forestier (Air-litière et/ou sol organique - sol minéral). Schéma adapté de Ulaby *et al.* (1981).

La réflectivité cohérente est donnée par l'équation 2.19.

$$\Gamma(p, \theta, d) = \frac{\Gamma_1 + \frac{\Gamma_2}{L_2^2} + \frac{2\sqrt{\Gamma_1\Gamma_2}}{L_2} \cos(2\beta_2' d + \Phi_1 - \Phi_2)}{1 + \frac{\Gamma_1\Gamma_2}{L_2^2} + \frac{2\sqrt{\Gamma_1\Gamma_2}}{L_2} \cos(2\beta_2' d + \Phi_1 - \Phi_2)} \quad 2.19$$

Avec $\Gamma_1 = |R_1|^2$, $\Gamma_2 = |R_2|^2$, $R_1 = |R_1|e^{j\phi_1}$, $R_2 = |R_2|e^{j\phi_2}$. R_1 est le coefficient de réflexion à l'interface air- litière, alors que R_2 est le le coefficient de réflexion à l'interface litière-sol minéral. ϕ_1 et ϕ_2 sont les angles de phase de R_1 et R_2 respectivement.

$\beta_2' = \beta_2 \sec \theta_2$ avec $\beta_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \text{Re}(\sqrt{\epsilon_2})$, ϵ_2 étant la permittivité de la couche de litière. λ_0 est la longueur d'onde dans l'air. L_2 est le facteur de perte de la couche de litière. Il est fonction

de la permittivité et de l'épaisseur de cette couche, et de l'angle θ_2 : $L_2 = e^{2\alpha_2 d \sec \theta_2}$. $\alpha_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0} |Im(\sqrt{\epsilon_2})|$. Des explications plus approfondies sur ce modèle sont fournies dans Ulaby *et al.* (1981, p 232-237).

Une fois cette réflectivité cohérente calculée, elle est corrigée des effets de la rugosité par l'équation 2.20 (Schmugge et Choudhury, 1981) où n et h sont des paramètres empiriques.

$$R_p(p, \theta, d) = \Gamma(p, \theta, d) \cdot e^{(-h \cdot \cos^n(\theta))} \quad 2.20$$

Les permittivités des couches constituant le sol forestier sont des entrées aux modèles cohérents. Pour le calcul de la permittivité de la couche de litière, un modèle de milieu effectif isotrope a été utilisé par Schwank *et al.* (2008) et Kurum *et al.* (2012a). Dans les travaux de Della Vecchia *et al.* (2007), la permittivité du mélange air-litière est calculée avec le modèle quadratique des mélanges (Ulaby *et al.*, 1986). Pour la permittivité du sol, elle a été calculée avec le modèle de mélange diélectrique de Hallikainen *et al.* (1985) alors que le modèle de mélange diélectrique de Dobson *et al.* (1985) est adopté dans les travaux de Kurum *et al.* (2012a) et Grant *et al.* (2009). Pour estimer la permittivité d'une couche d'humus, l'équation empirique dérivée par Schaap *et al.* (1997) a été exploitée dans l'étude de Kurum *et al.* (2012a).

Nous nous intéressons plus particulièrement dans les sections suivantes à la caractérisation diélectrique des couches organiques et minérales de sols forestiers.

2.2.4. Caractérisation diélectrique de la couche du sol minéral

Des efforts considérables ont été consentis pour caractériser les propriétés diélectriques des sols minéraux. Différents modèles diélectriques ont été développés (Wang et Schmugge, 1980; Dobson *et al.*, 1985; Mironov *et al.*, 2004, 2009, 2013), validés et comparés (Bircher *et al.*, 2012; Montpetit *et al.*, 2015; Srivastava *et al.*, 2015).

Il est établi que le modèle de mélange diélectrique de Dobson *et al.* (1985) présente des performances faibles dans certains cas (Mironov *et al.*, 2004). Le modèle de Dobson *et al.* (1985) est dérivé empiriquement à partir d'un jeu de données limité de cinq différents types

de sol avec des fractions de sable inférieures à 50% (Mialon *et al.*, 2015). Si ce modèle est appliqué sur un type de sol en dehors de ceux du jeu de données ayant permis sa dérivation, des erreurs plus importantes sont observées (Mironov *et al.*, 2009). D'un autre côté, le modèle de Mironov *et al.* (2004) est un modèle physique basé sur la mesure du coefficient de réfraction et est construit à partir d'un jeu de données mesurées et des jeux de données modélisées, comprenant toute la gamme des conditions potentielles de sols, y compris le quartz de sable. Les résultats de simulation de Bircher *et al.* (2012), en utilisant le modèle L-MEB (Wigneron *et al.*, 2007), avaient montré que l'utilisation du modèle de Mironov *et al.* (2004) avait réduit substantiellement les erreurs de simulations.

Les modèles de Dobson *et al.* (1985) et de Mironov *et al.* (2009) sont évalués dans le cadre de la mission SMAP (Chan *et al.*, 2016) et de la mission SMOS (Mialon *et al.*, 2015). Dans cette dernière étude, le modèle de Mironov *et al.* (2013) qui tient compte de la température effective du sol a aussi été évalué et comparé aux deux modèles de Dobson *et al.* (1985) et de Mironov *et al.* (2009). Les modèles de Mironov *et al.* (2009, 2013), comparés au modèle de Dobson *et al.* (1985), permettent de s'affranchir de données d'entrées supplémentaires telles que le taux de sable et la densité apparente du sol. Les estimations de l'HS à une échelle globale ont montré que les résultats obtenus à partir du modèle de Mironov sont supérieurs à ceux obtenus avec le modèle de Dobson ($0,033 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ en moyenne). Toutefois, la comparaison des résultats des deux modèles avec des mesures *in situ* sur différents sites d'étude ne démontre pas une performance supérieure d'un modèle par rapport à un autre (Mialon *et al.*, 2015).

Il est important de noter qu'il n'existe pas de modèle qui peut couvrir toutes les conditions de sol existantes, telles que les sol riches en matières organiques, les sols gelés ou en dégel, les sols des tundras arctiques et les sols de forêts boréales (Mialon *et al.*, 2015). Dans nos travaux de recherches, nous avons comparé les perforances des modèles de Dobson *et al.* (1985) et de Mironov *et al.* (2009), en termes d'erreur de simulations, sur nos sites d'étude tel que fait dans le cadre de la mission SMAP.

Nous allons nous intéresser dans la section suivante aux approches et modèles utilisés pour la détermination des propriétés diélectriques des couches organiques de litière et d'humus.

La nature et les propriétés physicochimiques des couches de litière, d'humus et de sols organiques sont différentes de sorte que le lien entre les permittivités diélectriques et le contenu en eau de ces couches est différent et doit être traité séparément (Kurum *et al.*, 2012a).

2.2.5. Caractérisation diélectrique de la couche organique de litière

Pour le calcul de la permittivité de la couche de litière, un modèle de milieu effectif isotrope a été utilisé par Schwank *et al.* (2008) et Kurum *et al.* (2012a). Pour illustrer ce type de modèle, nous prenons pour exemple le cas d'une litière de feuilles (Schwank *et al.*, 2008). Dans ce type de modèles, une forme géométrique approchant des feuilles (ou aiguilles) constituant la couche de litière est assumée, généralement des ellipsoïdes caractérisés par les axes a , b et c (figure 2.9).

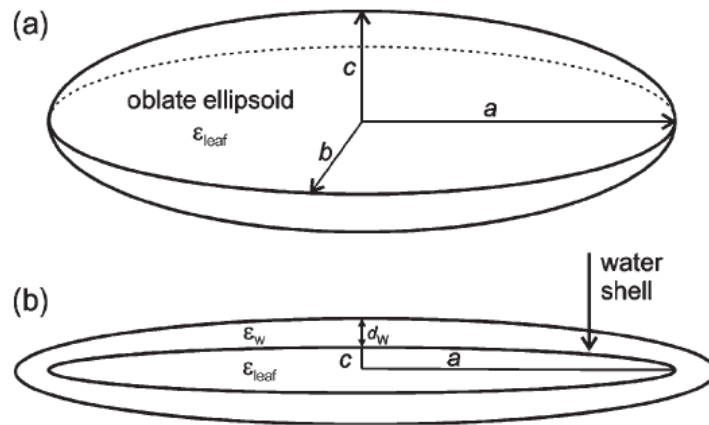


Figure 2.9. Inclusions diélectriques utilisées dans l'approche de milieu effectif pour la détermination de la permittivité de litière de feuilles ϵ_L , (a): ellipsoïde représentant une feuille, (b): coupe verticale de l'ellipsoïde couvert d'une fine couche d'eau d'épaisseur d_w . (Schwank *et al.*, 2008)

Le cœur de ces ellipsoïdes constitue la matière organique sèche des feuilles dont la permittivité est ϵ_{leaf} (figure 2.9a). Le contenu en eau de la couche de litière est modélisé en considérant une fine couche d'eau d'épaisseur d_w et de permittivité ϵ_w (figure 2.9b). La permittivité de la couche de litière (air + feuilles humides) est donnée par l'équation 2.21

(Sihvola, 1999).

$$\varepsilon_L = \varepsilon_A + \frac{(\Pi_a + \Pi_b + \Pi_c)}{3} \quad 2.21$$

Ou ε_A est la permittivité de l'air. Π_a , Π_b , Π_c sont les composantes polarisables de permittivités selon les axes a , b et c. Elles sont formulées dans Sihvola et Lindell (1990). Elles sont fonction entre autres de la permittivité et du volume de la couche de l'eau, de la permittivité de l'ellipsoïde de la matière sèche ε_{leaf} des feuilles et de la permittivité de l'air ε_A , etc.

La permittivité de l'ellipsoïde de matière sèche de la feuille est donnée par l'équation 2.22. m_d est la fraction de la matière sèche de la feuille, ε_{sw} est la permittivité de l'eau saline contenue dans la matière sèche. De plus amples détails sont aussi fournis dans Schwank *et al.* (2008).

$$\varepsilon_{leaf} = 0.522 (1 - 1.32m_d)\varepsilon_{sw} + 0.51 + 3.84m_d \quad 2.22$$

Cette approche a été adoptée par Grant *et al.* (2009) pour modéliser la permittivité d'une couche de litière d'un site forestier de conifères. Une autre approche plus simple a été proposée par Della Vecchia *et al.* (2007) pour estimer la permittivité d'une couche de litière d'un site forestier de conifères. La couche de litière est supposée composée de biomasses végétales sèche et fraîche (matériau diélectrique) et d'air. Les données nécessaires sont l'épaisseur de la couche de litière (T_L), la biomasse fraîche D_F ($kg\ m^{-2}$) et le contenu en eau gravimétrique DMC ($kg\ kg^{-1}$) des feuilles et/ou des aiguilles. Les feuilles et/ou les aiguilles constituent le matériau diélectrique de la couche de litière. La biomasse sèche D_D du matériau diélectrique est exprimée en fonction de D_F et de DMC selon l'équation 2.23.

$$D_D = D_F (1 - DMC) \quad 2.23$$

Le volume de la partie sèche VD_S et de la partie humide VD_W du matériau diélectrique par unité de surface peuvent être calculés respectivement par les équations 2.24 et 2.25. $\rho_s(kg\ m^{-3})$ est la densité de la matière sèche. ρ_w est la densité de l'eau.

$$VD_S = \frac{D_D}{\rho_s} \quad 2.24$$

$$VD_W = \frac{D_F - D_D}{\rho_w} \quad 2.25$$

La fraction de volume du matériau diélectrique V_F est donnée par l'équation 2.26.

$$V_F = \frac{(VD_W + VD_S)}{T_L} \quad 2.26$$

La permittivité de la couche de litière ε_{mix} (matériau diélectrique + air) est estimée en utilisant le modèle de mélange diélectrique donné par l'équation 2.27 (Ulaby *et al.*, 1986). Le paramètre α est égal à 0,5. Dans ce cas, ce modèle est appelé 'Refractive Model', car élever la permittivité d'un milieu à une puissance de 0,5 donne l'indice de réfraction.

$$\varepsilon_{mix}^\alpha = \varepsilon_A^\alpha + V_F(\varepsilon_{DM}^\alpha - \varepsilon_A^\alpha) \quad 2.27$$

ε_A est la permittivité de l'air et ε_{DM} est la permittivité du matériau diélectrique. Elle est calculée avec un modèle empirique (Ulaby et El-rayes, 1987), à partir des mesures gravimétriques du contenu en eau du matériau diélectrique.

Vu la simplicité de cette approche, en termes de la formulation physique, relativement à l'approche de milieu effectif d'estimation de la permittivité de la couche de litière, elle a été adoptée dans le cadre de nos travaux de recherche.

2.2.6. Caractérisation diélectrique de la couche organique d'humus

La méthode largement utilisée pour la mesure du contenu en eau des sols minéraux est

basée sur la Réflectométrie dans le Domaine Temporel (en anglais : Time Domain Reflectometry). À cause de la différence des propriétés physicochimiques (densité, porosité, etc.) des sols organiques et des sols minéraux, les relations entre les propriétés diélectriques de ces sols et leurs contenus en eau sont très différentes. Dès lors, il est impossible d'avoir des équations de calibration universelles pour tous les types de sols existants (Pumpanen et Ilvesniemi, 2005). Pour ce qui est de la couche d'humus, très peu d'équations de calibration ont été développées.

Dans les travaux de Pumpanen et Ilvesniemi (2005), deux types d'échantillons d'humus ont été collectés sur une forêt âgée de 130 ans et constituée de deux espèces de conifères. Certains de ces échantillons ont été gardés tels que récupérés (non perturbés : type 1) et d'autres ont été homogénéisés (type 2) dans le but d'étudier l'impact de l'erreur de détermination du volume et de la densité apparente des échantillons sur la qualité de calibration. Pour ce faire, trois équations reliant la constante diélectrique (ϵ) au contenu en eau volumique (VWC) des échantillons ont été utilisées. Il s'agit de celle présentée dans Ledieu *et al.* (1986) et Topp *et al.* (1980) ainsi que celle des auteurs de cette étude (Pumpanen et Ilvesniemi, 2005). Ces équations de calibration sont données respectivement par les relations 2.28, 2.29 et 2.30. Pour chaque équation, les paramètres a, b, c et d ont été calibrées avec les données de VWC et de ϵ mesurées des échantillons de type 1 et de type 2. Les équations de Ledieu *et al.* (1986) et de Topp *et al.* (1980) ont été exclusivement formulées pour des sols minéraux. L'idée de les utiliser dans le cadre de cette étude est de voir si elles sont exploitables dans une plage de variation de la constante diélectrique d'humus.

$$VWC = a\sqrt{\epsilon} - b \quad 2.28$$

$$VWC = a + b\epsilon + c\epsilon^2 + d\epsilon^3 \quad 2.29$$

$$VWC = a \ln(\epsilon) - b \quad 2.30$$

L'équation 2.30 fournit les meilleurs résultats pour des valeurs de VWC élevées et basses.

L'équation de Ledieu *et al.* (1986) sous-estime le contenu en eau pour des valeurs de ε entre 10 et 40 et ce pour les échantillons de type 1 et de type 2. Quand l'équation de Topp *et al.* (1980), exprimée avec les paramètres a, b, c et d calibrés pour le cas des sols minéraux, est utilisée, elle sous-estime VWC pour des valeurs de ε inférieures à 10. Cette étude de Pumpanen et Ilvesniemi (2005) conclut que pour la couche organique d'humus, le facteur critique dans l'élaboration d'équations de calibration fiables est la détermination précise du volume des échantillons.

Schaap *et al.* (1997) ont développé une formule de calibration à partir de 25 échantillons de sol organique acquis sur différents types de forêts, y compris des forêts de feuillus, pour passer du contenu en eau volumétrique du sol organique (VMC) aux permittivités. Cette formule (partie réelle ε_{SO} de la constante diélectrique) est donnée par la formule 2.31.

$$\varepsilon_{SO}(VMC) = \left(\frac{\left[(VMC)^{\frac{1}{0.885(\pm 0.018)}} + 0.146(\pm 0.002) \right]}{[0.133 (\pm 0.002)]} \right)^2 \quad 2.31$$

La partie imaginaire de la constante diélectrique peut être prise égale à un dixième de la partie réelle (Ulaby et Jedlicka, 1984). Les mesures de contenu en eau gravimétriques sont multipliées par la densité apparente pour donner les contenus en eau volumique. La valeur de densité apparente ($0,075 \text{ g cm}^{-3}$) de la couche organique d'humus a été prise d'une étude faite sur des forêts de peuplier faux-tremble de la région de l'Alberta, Canada (Redding *et al.*, 2005).

Chapitre 3. Sites d'étude et données acquises lors des campagnes de mesures

Pour développer, tester et valider des modèles théoriques, des données expérimentales de recherche doivent être acquises. L'acquisition de ces données doit se faire selon une méthodologie répondant à différentes conditions d'observation (fréquence, polarisation, angle d'incidence) et pour une large variété de surfaces observables (couverts végétaux agricoles et naturels, forêts), différents types de sol et différentes conditions d'HS (Chukhlanstev, 2006).

Les données exploitées dans ce travail de recherche viennent de trois campagnes de mesures terrain. Le premier jeu de données est acquis durant la campagne *Soil Moisture Active Passive Validation Experiment in 2012* (SMAPVEX12). Les deux autres jeux de données proviennent de deux autres campagnes. Elles se sont déroulées sur des sites forestiers pas loin du campus de l'Université de Sherbrooke, Québec, Canada. Tous les sites forestiers concernés par ces campagnes sont constitués majoritairement de feuillus. Ces données vont nous permettre d'apporter une compréhension supplémentaire de l'interaction des TB, en bande L, avec des milieux forestiers dans une perspective de l'estimation de l'HS.

3.1. Localisation géographique des sites des campagnes de terrain

La zone d'étude de SMAPVEX12 (97°37'14,06'' — 98°33'40,58'' O et 49°24'04,46'' — 49°31'43,57'' N) est située au nord du bassin de la rivière rouge, dans la région ouest du centre de la province du Manitoba (figure 3.1), Canada. Elle couvre une superficie de 12,8 km x 70 km. Notre étude porte sur les sites forestiers de cette campagne. Ils occupent le nord-ouest de la zone d'étude (rectangle jaune en trait discontinu). Quatre sites forestiers ont été ciblés pour être étudiés, mais afin de répondre aux objectifs fixés par cette thèse, nous nous intéressons uniquement aux sites F2 et F3 pour la disponibilité des données nécessaires à nos simulations. La campagne s'est déroulée du 6 juin au 17 juillet 2012. Plus de détails sur cette campagne sont fournis par McNairn *et al.* (2015). Une vue aérienne et les limites de chacun de ses deux sites sont illustrées sur la figure 3.1. Les lignes rouges

qui y figurent représentent les traces au sol des lignes de vols aéroportés pour l'acquisition des données de TB.

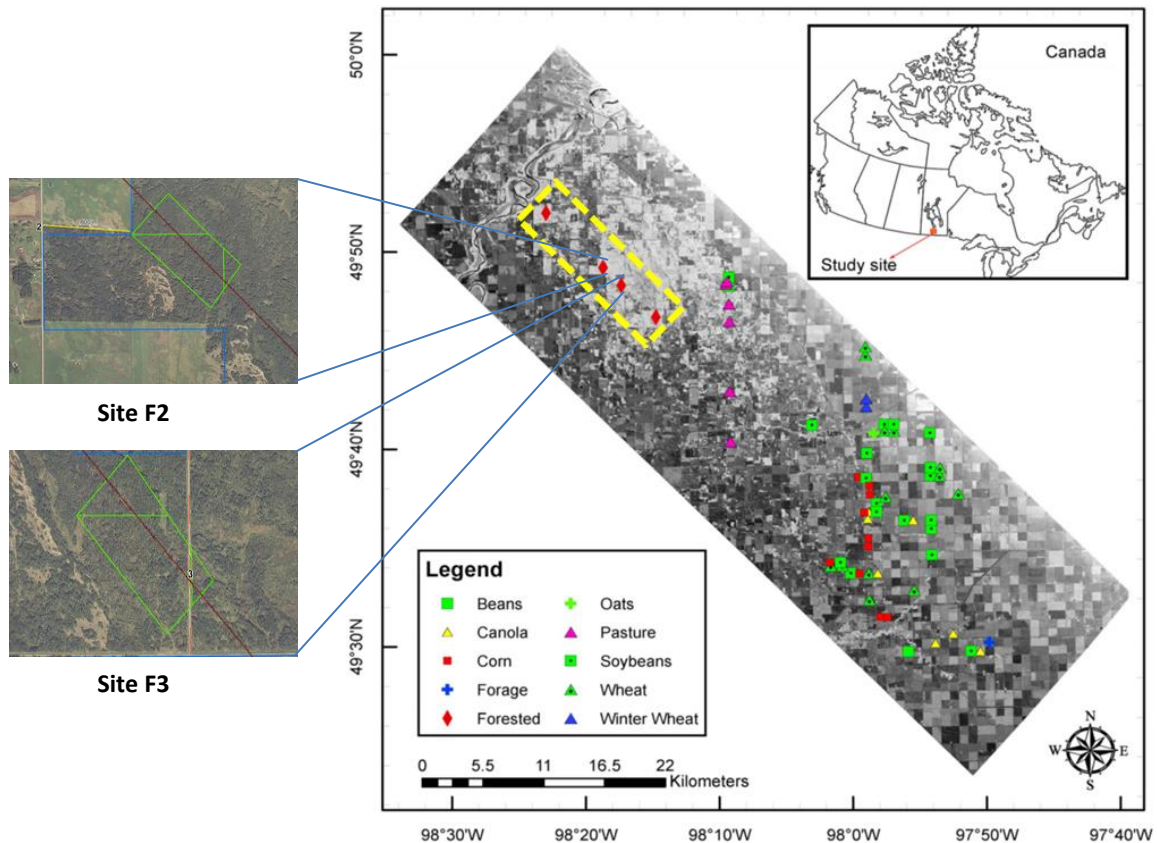


Figure 3.1 Zone d'étude de la campagne SMAPVEX 12 et localisation des sites forestiers (losanges rouges) (Wang *et al.*, 2016)

La figure 3.2 illustre les localisations relatives des sites forestiers des deux autres campagnes par rapport à l'Université de Sherbrooke sur un fond Google Earth avec un zoom sur chaque site. Le premier site forestier est situé derrière le collège Mont-Ste-Anne. Le deuxième site est situé pas loin du Site Interdisciplinaire de Recherche en Environnement Extérieur (SIRENE) de l'Université de Sherbrooke.

Pour alléger le texte de ce document, ces deux sites seront dénommés dans ce document SF-MSA pour le site forestier du collège Mont-Ste-Anne et SF-SIRENE pour le site forestier près de la station SIRENE. La campagne du site SF-MSA s'est déroulée du 19 au 23 août 2016. La campagne du site SF-SIRENE a eu lieu du 30 août au 2 septembre 2016.



Figure 3.2. Localisation du site forestier du collège Mont-St-Anne (SF-MSA) et du site forestier près de la station SIRENE (SF-SIRENE) par rapport à l'Université de Sherbrooke, Québec, Canada.

3.2. Caractéristiques générales des sites forestiers étudiés

Le sol forestier des sites d'étude est composé de deux couches qui sont la couche de sol minéral sur laquelle est superposée une couche de sol organique et de litière, dans le cas

des sites forestiers de la campagne SMAPVEX12, et d'une fine couche de litière dans le cas des sites SF-MSA et SF-SIRENE.

Les figures 3.3, 3.4, 3.5 et 3.6 illustrent le type de sous-bois et les couches organiques recouvrant le sol minéral respectivement sur les sites forestiers F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12 et les sites SF-MSA et SF-SIRENE. Il faut noter que ces couvertures peuvent varier spatialement à l'intérieur de chaque site forestier. Les arbres du site F2 sont plus matures que ceux du site F3. De ce fait, le site F2 présente un contenu en eau des arbres supérieur à celui du site F3 (voir tableau 3.1). Sur le site F3, des clairières sont présentes sur lesquelles une couche d'herbe dense recouvre le sol. Le sous-bois du site F2 est dense avec de petits arbres, des arbustes hauts et de la végétation basse. Le sol du site F3 est couvert de litière et d'herbe ainsi que d'un sous-bois dense.



Figure 3.3. Types de sous-bois et des couches organiques recouvrant le sol du site forestier F2.

Sur le SF-MSA, la couche de sous-bois est composée d'arbustes de frêne d'une hauteur

moyenne de 80 cm. Cette couche est majoritairement composée de feuilles. Pour le cas du site SF-SIRENE, le sous-bois est composé de petits arbres et de végétation basse clairsemée. Le tableau 3.1 récapitule les caractéristiques importantes des sites forestiers d'intérêt.



Figure 3.4. Types de sous-bois et des couches organiques recouvrant le sol du site forestier F3



Figure 3.5. Types de sous-bois et des couches organiques recouvrant le sol forestier de la campagne SF-MSA



Figure 3.6. Types de sous-bois et des couches organiques recouvrant le sol forestier de la campagne SF-SIRENE

Tableau 3.1 Caractéristiques des sites forestiers d'étude

	Hauteur maximale (m)	DHP moyen des arbres (cm)	Densité des arbres (m ⁻²)	Épaisseur moyenne de la couche de litière (cm)	Hauteur moyenne de la couche de sous-bois (m)
F2	14	23,8	0,24	4,1	1,7
F3	17	18,7	0,43	2,4	4,4
SF-MSA	20	19,6	0,24	1,2	0,8
SF-SIRENE	17	9,9	0,94	1,1	1,5

Les données disponibles pour ce travail peuvent être regroupées en quatre familles : les données de TB aéroportées pour les sites de SMAPVEX12 et au sol de TB pour SF-MSA et SF-SIRENE, les données du sol forestier, les données du couvert forestier (les arbres et le sous-bois), et des données auxiliaires de stations météorologiques. Ces données sont nécessaires pour mener à terme notre projet de recherche. Chaque famille de données a été acquise en suivant un protocole de mesure spécifique.

3.3. Données de température de brillance

Concernant la campagne SMAPVEX12, les données de TB bipolarisées (H et V) ont été acquises avec le capteur aéroporté *Passif Actif L-band Sensor* (PALS) avec un angle d'incidence de 40° et selon deux altitudes de vol (McNairn *et al.*, 2015). La calibration des données PALS est basée sur une calibration interne et une calibration externe (McNairn *et al.*, 2015). Les TB acquises à basse altitude ont une résolution effective de 600 m. Cette résolution permet d'avoir des empreintes au sol avec un minimum d'hétérogénéité spatiale. En effet, l'écart-type de la variabilité des données calibrées de TB, le long des lignes de vol sur les sites F2 et F3, n'excède pas 3 K. De ce fait, ces données sont importantes pour des objectifs de modélisation et de validation (McNairn *et al.*, 2015). C'est pourquoi elles sont utilisées dans cette étude au lieu des données hautes altitudes.

Par contre, ces données ne permettent pas de caractériser et de séparer les contributions des différentes couches constituant un milieu forestier. Les deux autres campagnes conduites sur les sites SF-MSA et SF-SIRENE ont pour objectif de répondre à cette problématique. Pour ces deux campagnes, le radiomètre en bande L (1,413 GHz) du Centre d'Applications et de Recherches en Télédétection (CARTEL) de l'Université de Sherbrooke, Canada, a été utilisé selon deux configurations pour l'acquisition des TB bipolarisées. Le tableau 3.2 résume quelques caractéristiques de mesure de ce radiomètre (http://radiometrics.com/products-services/total_profiling/pr-series/).

Tableau 3.2. Caractéristiques de mesures du radiomètre du CARTEL

Précision des TB calibrées	$0,2 + 0,002 * TB_{ref} - TB_{sky} $
Résolution (dépend du temps d'intégration sélectionné)	0,1 à 1 K
Temps d'intégration (configurable)	10-2500 ms
Stabilité de mesure à long terme	$< 1 K$, 180 jours

Pour la précision des TB calibrées, TB_{ref} et TB_{sky} représentent respectivement les TB

mesurées de la cible (corps noir) à température ambiante, fournie par le constructeur, et de la cible froide ‘ciel’ utilisées dans l’opération de calibration. L’erreur de calibration des TB acquises par ce radiomètre est de 2 K.

La figure 3.7 illustre la configuration adoptée pour l’observation du sol du site SF-MSA et les dimensions approximatives de l’empreinte du radiomètre au sol. Installé sous la canopée sur une structure métallique reposant sur deux échelles, des observations à un angle d’incidence de 40° du sol forestier (litière, sol minéral) et du sous-bois ont été faites. La superficie de l’empreinte au sol du radiomètre est de $\sim 3 \text{ m}^2$. Aussi, en orientant le radiomètre vers la couronne des arbres avec le même angle d’incidence (40°), la contribution des arbres a été mesurée. À la fin de la campagne (23 août 2016), des mesures ont été prises après les enlèvements successifs de la couche de sous-bois et de la couche de litière pour voir l’effet séparé de ces deux couches sur l’émission du sol forestier. Ces opérations d’enlèvement des couches de litière et de sous-bois devaient durer le minimum de temps possible pour minimiser l’effet de la variation d’autres paramètres, tels que l’HS et la température, pouvant influencer l’émission du sol forestier. La rugosité de la surface ne devait pas aussi être modifiée. Les deux opérations avaient duré 5 minutes chacune. La figure 3.8 illustre le sous-bois avant et après l’avoir enlevé de la surface de l’empreinte au sol du radiomètre.

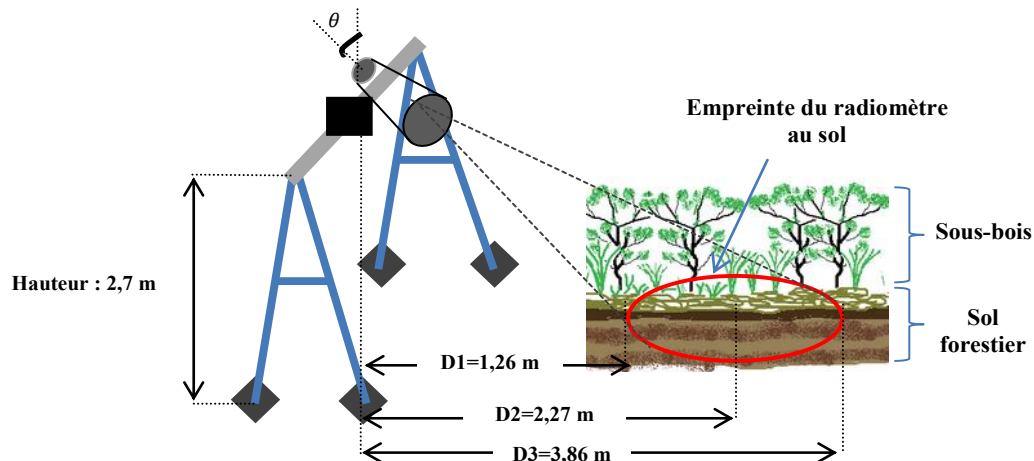


Figure 3.7. Configuration d’observation du sol forestier couvert de sous-bois de la campagne du site SF-MSA



Figure 3.9. Empreinte au sol du radiomètre en présence (à gauche) et en absence (à droite) du sous-bois de la campagne SF-MSA

Pour ce qui est de la campagne du site SF-SIRENE, le même radiomètre utilisé lors de la campagne du site SF-MSA a été utilisé. Installé sur une nacelle soutenue par un bras hydraulique tel qu'illustré sur la figure 3.9, le radiomètre faisait des observations à une hauteur de 17,8 m et à un angle d'incidence de 40° . La figure 3.10 schématise la forme approximative et les dimensions de l'empreinte du radiomètre au sol (surface $\approx 158 \text{ m}^2$).

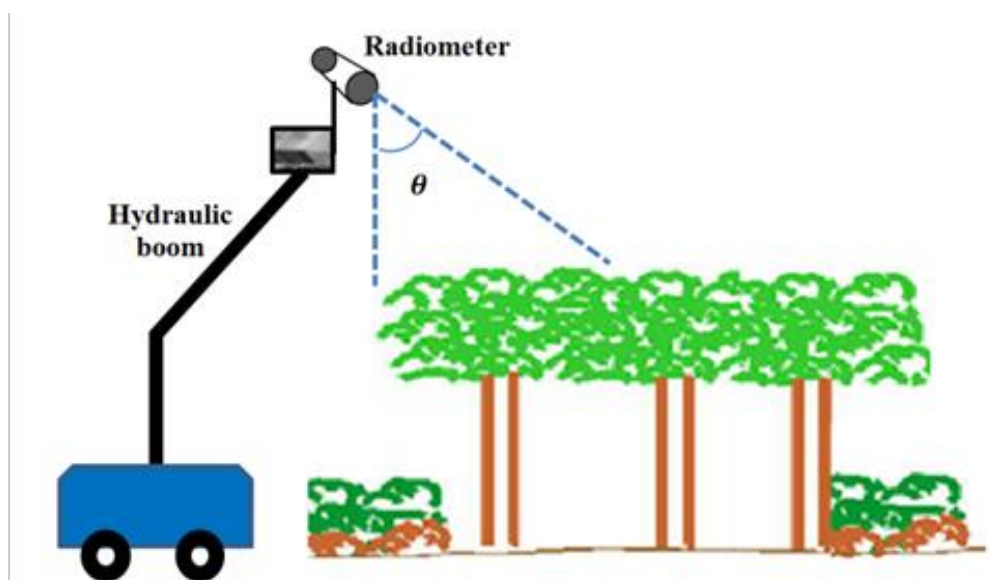


Figure 3.8. Configuration d'observation de la campagne SF-SIRENE

Le 1^{er} septembre 2016, durant l'après-midi, la couche de litière recouvrant le sol forestier a été enlevée pour constater son effet sur les données de TB observées. Vu la superficie de l'empreinte au sol, cette opération a pris approximativement 40 minutes. À la fin de cette campagne (2 septembre), le radiomètre étant installé sous la canopée forestière, des mesures du sol minéral (sans litière) ont été faites avec le même angle d'incidence (40°) que les observations faites au-dessus de la canopée. Ces données nous ont servi à calibrer les paramètres du modèle de réflectivité du sol forestier.

3.4. Données caractérisant le couvert végétal (arbres et sous-bois)

Des données spécifiques sur le couvert forestier (arbres et/ou sous-bois) sont requises pour nos objectifs de modélisation de l'émission du milieu forestier. Pour collecter ces données, un échantillonnage spatial et un échantillonnage destructif ont été menés.

L'échantillonnage spatial consistait à répertorier plusieurs paramètres (DHP, hauteur du tronc, hauteur de l'arbre, type et état de l'arbre, angle des branches primaires, type et fraction de couverture du sous-bois, etc.) des sites forestiers étudiés. L'échantillonnage destructif permet de collecter des mesures précises sur les éléments (branches, feuilles, troncs, sous-bois) constituant les couverts végétaux (arbres et/ou sous-bois), telles que les

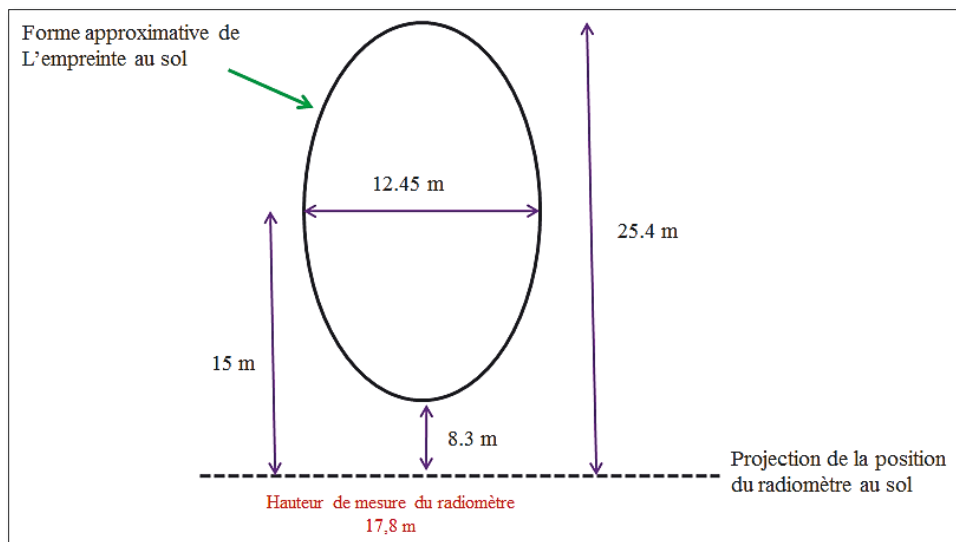


Figure 3.10. Dimensions approximatives de l'empreinte au sol selon la configuration d'observation de la campagne du site SF-SIRENE

dimensions (rayon et longueur), les densités spatiales, les constantes diélectriques et/ou les contenus en eau gravimétrique.

3.4.1. Échantillonnage spatial

Pour entreprendre l'échantillonnage spatial sur les sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12, une aire circulaire d'un rayon de 100 m, représentative de l'hétérogénéité de chaque site a été choisie. Deux axes orthogonaux centraux ont été définis sur cette aire. L'échantillonnage spatial s'est fait sur tous les arbres dont le DHP est supérieur à 1 pouce (2.54 cm) et compris dans un segment de 2 m le long des deux axes orthogonaux (McNairn *et al.*, 2015).

Concernant SF-MSA, une aire circulaire d'un diamètre arbitraire de 7 m, dont le centre est le centre de la trace au sol du radiomètre a été considérée pour faire l'échantillonnage spatial. Une hauteur approximative et le DHP de tous les arbres compris dans cette aire ont été répertoriés. Pour le site SF-SIRENE, les arbres compris dans l'empreinte au sol du radiomètre ont été échantillonnés après avoir terminé les mesures radiométriques.

3.4.2. Échantillonnage destructif

Pour la campagne SMAPVEX12, un arbre représentatif a été choisi sur le site F2 et un autre sur le site F3. Ces arbres ont été choisis visuellement comme étant représentatifs des sites F2 et F3, mais pas au sens statistique pour représenter les arbres observés par le radiomètre PALS. Ces arbres ont été abattus pour procéder à l'échantillonnage destructif. Sur chaque arbre représentatif abattu, le comptage du nombre de branches primaires et secondaires et des feuilles a été fait. L'angle et les dimensions (rayon et longueur) des branches primaires et secondaires ont été enregistrés. L'échantillonnage destructif permet de calculer le contenu en eau global approximatif des arbres à partir des mesures géométriques de l'arbre représentatif. La procédure consiste premièrement à calculer le volume d'un arbre à partir de l'échantillonnage destructif. D'après la littérature, jusqu'à 50 % de la biomasse d'un arbre est constituée d'eau (Hakkila, 1989). Cette proportion varie selon le type d'arbre (densité du bois) et son âge (Hakkila, 1989). Pour les arbres de nos sites forestiers, le contenu en eau (WC en $m^3/arbre$) d'un arbre peut être approximé par

$0,45 \times \text{volume de l'arbre}$. WC est multiplié par la densité spatiale des arbres ($\# \text{arbres} / m^2$) et la masse volumique de l'eau (kg/m^3) pour donner le contenu en eau des arbres (kg/m^2). Pour faire les mesures de constantes diélectriques des branches, des troncs et des feuilles, une sonde et un analyseur vectoriel de spectre de la famille FieldFox (réf: N9923A) ont été utilisés (McNairn *et al.*, 2015).

Concernant le site SF-MSA, à la périphérie de la trace au sol du radiomètre, des arbustes représentatifs de ceux observés par le radiomètre ont été ramassés de façon aléatoire sur une portion-échantillon, d'une superficie de 38 cm x 38 cm. La dimension et la hauteur de leurs tiges ont été mesurées. Toutes les feuilles comprises dans cette aire ont été comptabilisées pour estimer leur densité. Les dimensions de chaque feuille ont été mesurées pour retrouver les dimensions moyennes de toutes les feuilles.

Pour estimer les constantes diélectriques des tiges et des feuilles, des échantillons d'arbustes de frêne ont été récupérés, de la même façon que décrit précédemment, et séchés afin d'estimer leur contenu en eau gravimétrique. Ceci est fait pour chaque acquisition radiométrique. Les contenus en eau gravimétrique mesurés en matinée et en après-midi ont permis l'estimation des constantes diélectriques à travers un modèle diélectrique de matières végétales (Ulaby et El-rayes, 1987). La figure 3.11 illustre les valeurs de constantes diélectriques des tiges et des feuilles de frênes estimées par ce modèle.

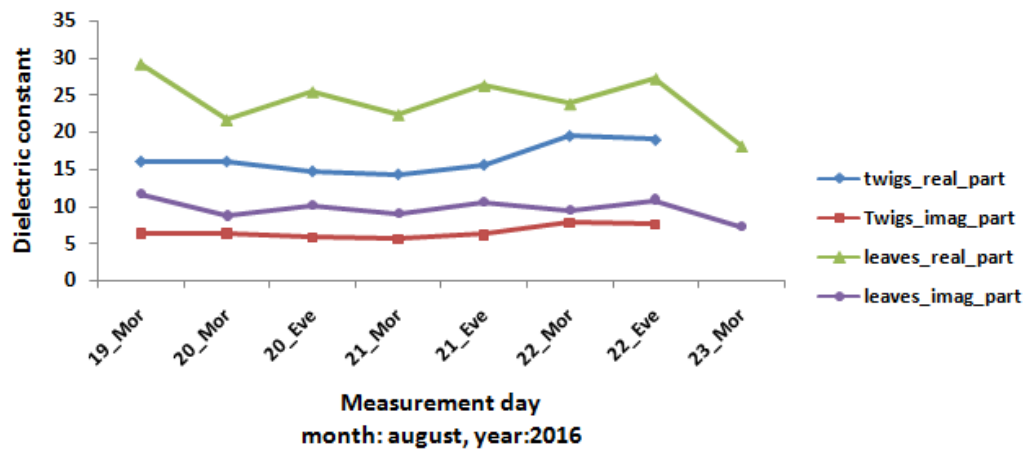


Figure 3.11. Valeurs des constantes diélectriques des tiges et des feuilles des arbustes de frêne du site SF-MSA estimées par le modèle de matières végétales de Ulaby et El-rayes (1987).

Sur l'axe des abscisses de la figure 3.11, les abréviations 'xx_Mor' et 'xx_Eve' réfèrent respectivement aux mesures faites le matin et l'après-midi, avec 'xx' étant la date de la mesure. Cette figure illustre une très faible variabilité des constantes diélectriques des tiges entre le matin et l'après-midi. Par contre, des variations sont observées pour la partie réelle des constantes diélectriques des feuilles. Ces dernières varient considérablement entre le matin et l'après-midi. Le contenu en eau des feuilles des arbres varie avec le temps durant le jour. Il est maximal la nuit ou jusqu'à avant l'aube, et est minimum durant les premières heures de l'après-midi (Gates, 1991; Mavrovic et al., 2018).

Pour le site SF-SIRENE, un arbre représentatif de ceux se trouvant dans l'empreinte au sol du radiomètre a été choisi pour être échantillonné. Pour le cas de ce site, l'échantillonnage destructif a été fait sans abattre l'arbre grâce à la commande du bras hydraulique de la nacelle. Pour cette campagne, des mesures de constantes diélectriques ont été faites sur des troncs des espèces présentes (peuplier faux-tremble et bouleau gris) et sur une branche de faux-tremble. Un procédé similaire à celui adopté pour SMAPVEX12 a été adopté durant la campagne du site SF-SIRENE, sauf que ce dernier ne permettait pas de mesurer la constante diélectrique des feuilles. Le concept de la sonde utilisée (Mavrovic *et al.*, 2018) est basé sur le même principe qu'une sonde mise au point pour la mesure de constantes diélectriques du béton (Filali *et al.*, 2008). La profondeur de mesure (*probing depth* en anglais) de la sonde est de 10 mm. Des incertitudes de 3,3 % sont associées aux mesures des constantes diélectriques (Mavrovic *et al.*, 2018). Pour les troncs, les mesures ont été faites à plusieurs profondeurs à partir de l'écorce et à des moments différents de la journée (matin, après-midi, soir). La figure 3.12 illustre les parties réelles (a) et les parties imaginaires (b) des constantes diélectriques mesurées le matin, l'après-midi et le soir en fonction de la profondeur radiale de mesure sur le même tronc d'un peuplier faux-tremble.

La figure 3.13 illustre les mesures de constantes diélectriques selon quatre profondeurs (1, 5, 10 et 15 cm) à partir de l'interface entre l'aubier et le bois de cœur pour un tronc d'un peuplier faux tremble du site F3 ayant un DHP de 34 cm. Les mesures de constantes diélectriques des feuilles d'un peuplier faux-tremble du site F2 sont illustrées sur la figure 3.14. Sur cette figure, les mesures sont faites sur des feuilles prises à plusieurs hauteurs de la couronne : la partie supérieure, la partie centrale et la partie inférieure. L'ondulation

observée sur les courbes des figures 3.13 et 3.14 sont dues au bruit de mesure.

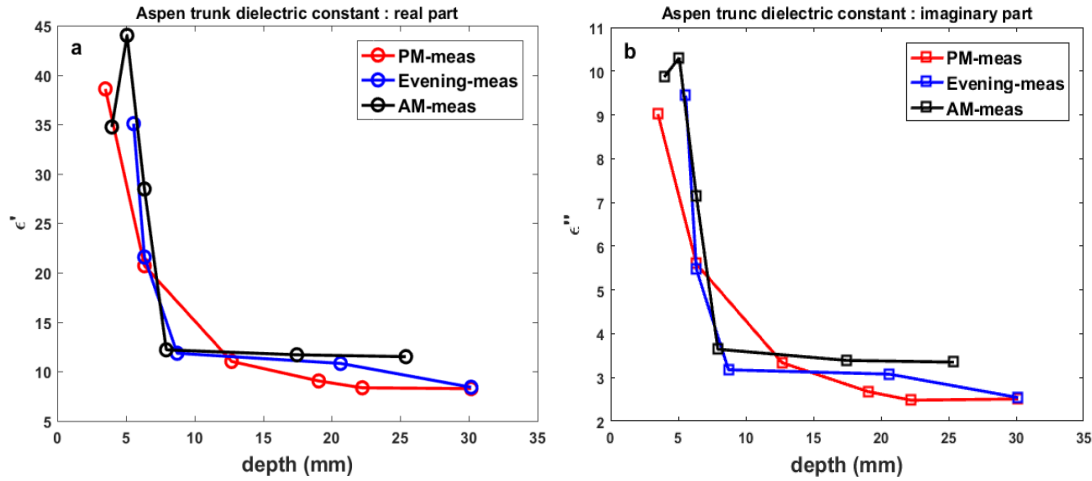


Figure 3.12. Constantes diélectriques d'un tronc de peuplier faux-tremble en fonction de la profondeur radiale : a – partie réelle, b – partie imaginaire, mesurées le matin (AM-meas), l'après-midi (PM-meas) et le soir (Evening-meas) durant la campagne du site SF-SIRENE

Les troncs sont généralement constitués de trois couches concentriques: l'écorce, le bois doux et le bois dur. La couche fine (cambium) de l'aubier, en anglais *sapwood*, qui est juste sous l'écorce est plus humide que les couches du bois de cœur, en anglais *heart wood*, se trouvant plus en profondeur. La couche cambium est plus humide, car c'est la couche transportant l'eau et les éléments nutritifs, la couche de bois de cœur est plutôt une couche de support pour l'arbre (Gates, 1991). De ce fait, les valeurs de constantes diélectriques diminuent à partir du cambium et en allant plus en profondeur dans le tronc.

Une comparaison entre les figures 3.12 et 3.13 montre que les valeurs de constantes diélectriques mesurées pour la couche superficielle de cambium, juste sous l'écorce, sont du même ordre de grandeur à une profondeur de 5 à 7 mm pour SF-SIRENE, et à 10 mm pour SMAPVEX12. Les constantes diélectriques des arbres mesurées durant SMAPVEX12 à 10 et 15 cm de profondeur sont largement supérieures à celles mesurées aux mêmes profondeurs pour SF-SIRENE.

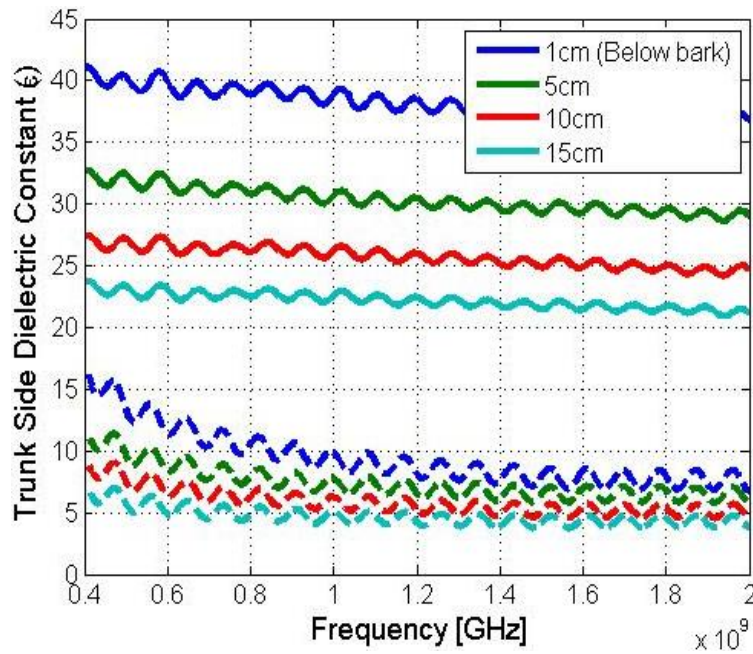


Figure 3.13. Mesures de constantes diélectriques en fonction de la fréquence pour plusieurs profondeurs d'un tronc (DHP = 34 cm) de peuplier faux-tremble du site F3 de la campagne SMAPVEX12. Trait continu: partie réelle, trait discontinu: partie imaginaire.

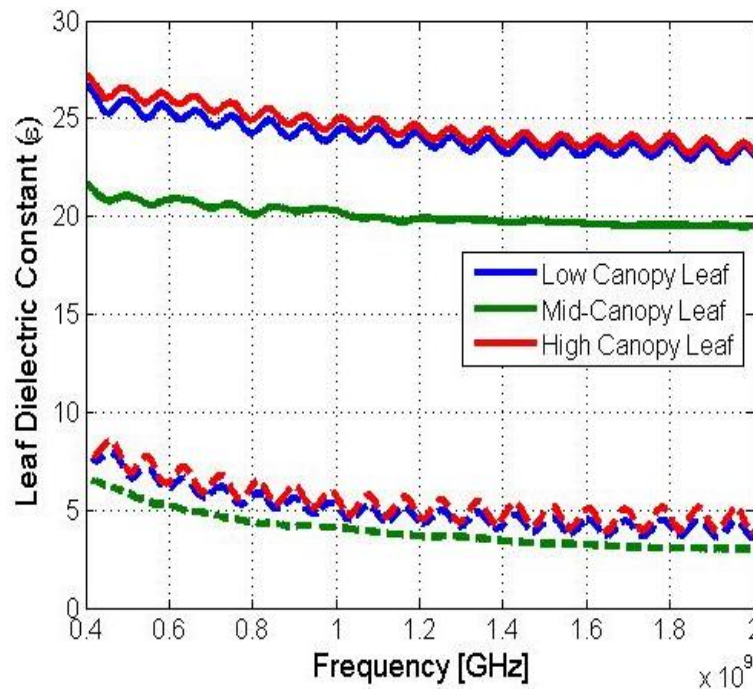


Figure 3.14. Mesures de constantes diélectriques des feuilles d'un peuplier faux-tremble du site F2 d'un DHP de 21 cm de la campagne SMAPVEX12. Trait continu: partie réelle, trait discontinu: partie imaginaire.

3.5. Données caractérisant le sol forestier (couches organiques et sol minéral)

Ces données proviennent de mesure d'humidité et de température du sol minéral, de contenu en eau gravimétrique du sol minéral et des couches organiques (humus et litière), de mesure des paramètres de rugosité du sol minéral et la mesure de l'épaisseur des couches de litière et/ou d'humus.

3.5.1. Données d'humidité et de température du sol minéral

Concernant la campagne SMAPVEX12, des mesures d'humidité et de température du sol à une profondeur de 5 cm ont été prises avec des sondes Hydra durant les 17 jours planifiés d'acquisition de données (McNairn *et al.*, 2015). Les erreurs (rmse) sur les données d'HS sont de $0,058 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (McNairn *et al.*, 2015). Elles sont estimées à partir de l'équation de calibration des mesures des sondes Hydra et des données d'HS gravimétriques. Les mesures commençaient dès 6 h:30 du matin et prenaient fin aux environs de 12h. Aussi, des stations temporaires installées par *United States Department of Agriculture* (USDA) et *Manitoba Agriculture, Food and Rural Development* (MAFRD) sur les sites F2 et F3 ont aussi permis la collecte quotidienne de données de température et d'humidité du sol avec une fréquence horaire d'enregistrement. Les stations USDA font des lectures d'HS à une profondeur de 3 à 7 cm, quant aux stations MAFRD, elles font des lectures à plusieurs profondeurs (5, 20, 50, et 100 cm).

Une comparaison entre les données d'humidité du sol mesurées par les sondes Hydra et calibrées, et celles mesurées par les stations temporaires a été entreprise. Sur le site F1, qui n'est pas considéré dans le cadre de cette thèse, nous avons remarqué des différences importantes entre les deux mesures. Contrairement aux sites F2 et F3, sur le site F1, les valeurs mesurées par les sondes Hydra sont très faibles relativement à celles mesurées par la station temporaire. De plus, sur le site F1, les données mesurées par les sondes Hydra présentaient des problèmes de calibration à cause du taux élevé de matière organique présente dans les sols forestiers étudiés. Sur les autres sites, nous avons remarqué que les deux mesures sont du même ordre. De ce fait, nous allons considérer dans nos travaux les données des stations temporaires F2 et F3.

Pour ce qui est de la campagne du site SF-MSA, à la périphérie de l’empreinte au sol du radiomètre, des sondes de mesure de la permittivité et de la température du sol minéral, de la firme Decagon Devices (Decagon Devices, 2015), ont été installées horizontalement à des profondeurs de 2,5 et 5 cm sous la surface du sol minéral. Ces profondeurs ont été choisies pour capturer la variabilité de l’HS dans la profondeur de sensibilité des mesures radiométriques en bande L (0-5 cm). Ces sondes enregistrent des mesures de permittivité à la fréquence de 10 secondes. Pour nos travaux de modélisation, cette fréquence était élevée, mais elle aurait bien pu être réglée. En utilisant l’équation de calibration de Topp *et al.* (1980) pour passer des permittivités aux données d’HS, l’erreur sur ces dernières est de $\pm 0,05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$.

Pour la campagne du site SF-SIRENE, avant le début des mesures radiométriques, les mêmes sondes Decagon, utilisées durant la campagne du site SF-MSA, ont été installées dans l’empreinte au sol du radiomètre et aux mêmes profondeurs (2,5 et 5 cm). De plus, une sonde Theta de type ML2, de la firme Delta-T Devices (Delta-T Devices Ltd, 1998), a également été utilisée pour faire des mesures d’HS. Pour ce faire, neuf points localisés autour de l’empreinte au sol du radiomètre ont été définis pour collecter ces mesures pour chaque acquisition radiométrique. Les sondes sont introduites verticalement dans le sol pour fournir des mesures intégrées sur une profondeur de 6 cm à partir de la surface du sol. Après calibration, la précision des mesures d’HS est $0,05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (Delta-T Devices Ltd, 1998).

3.5.2. Données gravimétriques du sol minéral et du sol organique (litière et humus)

Des échantillons de sol minéral sont requis pour des fins de calibration des données d’HS acquises par les sondes et pour la détermination des propriétés physiques du sol, telles que la texture et la densité apparente. Pour des sites forestiers, des échantillons de sol organique (litière et humus) doivent aussi être collectés pour des fins de modélisation de l’émission du sol forestier.

Durant la campagne SMAPVEX12, des échantillons de sol minéral ont été pris au niveau de chaque point des axes orthogonaux de l’aire représentative pour faire la calibration des mesures d’HS des sondes Hydra. À cause des ressources limitées, des mesures intensives

du contenu en eau de la couche de litière et d'humus n'ont pas été conduites, tel que fait pour le cas du sol minéral (McNairn *et al.*, 2015). À défaut, à l'intérieur de l'aire circulaire représentative de chaque site, un seul échantillon de sol organique (litière et humus) a été collecté pour faire les mesures gravimétriques. Pour ce faire, la couche organique (litière et humus), se trouvant au-dessus du sol minéral, a été grattée et collectées sur une surface échantillon carrée de 38 cm². Cela implique que les contenus en eau gravimétrique qui ont été dérivés de ces échantillons sont des contenus en eau globaux de ces deux couches (litière et humus). De plus, les mesures gravimétriques faites et exploitables ne couvrent pas tous les jours d'acquisition radiométrique.

Durant les campagnes des sites SF-MSA et SF-SIRENE, pour chaque période de mesures, des échantillons de litière et de sol minéral ont été collectés à la périphérie de la surface couverte par l'empreinte du radiomètre au sol. La même méthode de collecte que celle expliquée pour le cas de la campagne SMAPVEX12 a été adoptée. Le nombre d'échantillons collectés dépendait de la taille de l'empreinte du radiomètre. Pour SF-MSA, vu la petite surface de l'empreinte du radiomètre au sol ($\sim 3 \text{ m}^2$), un seul échantillon de sol minéral et un seul échantillon de litière étaient collectés pour chaque acquisition radiométrique, alors que pour le site près de la station SIRENE, dont l'empreinte au sol du radiomètre est relativement plus importante (158 m^2), deux échantillons de ces deux couches avaient été collectés.

Les données de permittivités des sondes Decagon et Theta doivent être calibrées pour être exploitables. La manière idéale est de faire appel aux données gravimétriques *in situ* d'HS. Néanmoins, leur nombre est insuffisant pour dériver des équations statistiques significatives.

À titre illustratif, pour ce qui est de la campagne du site SF-MSA, la figure 3.15 montre les courbes de corrélation entre les données gravimétriques d'HS *in situ* et les valeurs de permittivités mesurées par les sondes Decagon EC2 et EC3. Ces sondes sont installées dans le sol minéral à des profondeurs respectives de 2,5 cm et 5 cm. Des corrélations encore plus faibles sont obtenues durant la campagne du site SF-SIRENE.

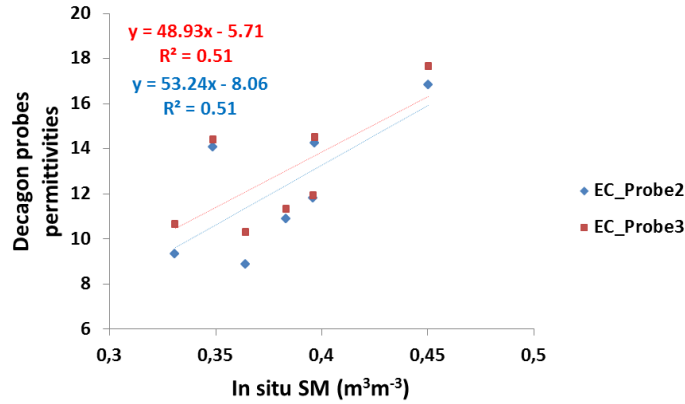


Figure 3.15. Corrélation entre les données de permittivités des sondes Decagon EC2 (2,5 cm de profondeur) et EC3 (5 cm de profondeur) et les données gravimétriques d'HS *in situ* de la campagne du site SF-MSA

Pour remédier au nombre réduit de données disponibles, nous avons fait appel aux équations de calibration fournies par le constructeur des sondes. L'équation utilisée pour la calibration des sondes est tirée des travaux de Topp *et al.* (1980). Elle a été utilisée pour passer des permittivités à l'HS selon l'équation 3.1. Si les sondes sont bien installées dans le sol minéral et que le sol minéral a une conductivité électrique inférieure à 10 dS / m, cette équation estime l'HS volumique avec une précision de $\pm 3 \%$.

$$HS = 4,3 * 10^{-6} \varepsilon^3 - 5,5 * 10^{-4} \varepsilon^2 + 2,92 * 10^{-2} \varepsilon - 5,3 * 10^{-2} \quad (3.1)$$

La figure 3.15 montre que les données de permittivités des sondes EC2 et EC3 ont les mêmes corrélations avec les données gravimétriques d'HS même si les sondes sont installées à des profondeurs différentes. Ceci indique une très faible variabilité de l'HS entre ces deux profondeurs de mesure. Sachant que les sondes Decagon font des mesures continues par rapport aux données *in situ* d'HS et les données de la sonde Theta, nous les avons retenues pour la suite des travaux de recherche entrepris. Pour les campagnes des sites SF-MSA et SF-SIRENE, l'équation 3.1 est utilisée pour passer des permittivités des sondes Decagon à l'HS.

3.5.3. Données de rugosité de surface et d'épaisseur des couches organiques

Pour ce qui est de la campagne SMAPVEX12, une mesure de l'épaisseur de la couche organique (litière et humus) a été faite au niveau de chaque point des axes orthogonaux de l'aire représentative, L'épaisseur moyenne de la couche de litière est obtenue en calculant la moyenne des mesures faites au niveau de chaque point. Les épaisseurs moyennes respectives de cette couche sur les sites F2 et F3 sont de 4 *cm* et 2 *cm*. En plus des mesures précédentes, des mesures de l'épaisseur de la couche de litière ont été prises autour de l'empreinte du radiomètre au sol sur SF-MSA et SF-SIRENE. Elles étaient similaires (~ 1 *cm*) sur ces deux sites.

Pour caractériser la rugosité de chaque site d'intérêt, deux mesures sont faites pour chaque site forestier. Pour ce faire, pour chaque mesure, des profils de la rugosité du sol de 3 m ont été formés à partir de la juxtaposition de trois profils de 1 m. Ces profils de 3 m ont été traités par la suite pour l'estimation des paramètres moyens de rugosité : écart-type des hauteurs et longueur de corrélation.

3.6. Données auxiliaires

Elles englobent les précipitations et les températures de l'air de stations météorologiques se situant à proximité des sites forestiers d'intérêt. Pour les sites de la campagne SMAPVEX12, elles sont fournies par la station Portage Southport d'Environnement Canada. Pour cette campagne, des températures Infra Rouge Thermique (IRT) ont été acquises simultanément avec les mesures de TB du radiomètre PALS. Pour les sites SF-MSA et SF-SIRENE, elles sont mesurées par la station météorologique installée SIRENE.

Les données de précipitations sont importantes pour analyser et interpréter la réponse des mesures radiométriques aux événements de précipitations sur les différents sites forestiers étudiés. Les données de températures de l'air sont complémentaires aux données de températures du sol et sont très importantes dans le processus de modélisation des observations radiométriques en MOP. Sur les milieux forestiers, plusieurs études ont mis l'accent sur la nécessité de définir une température équivalente ou composite à partir des températures du sol et du couvert végétal (équations 2.5 et 2.6). Dans cette température

composite, la température du couvert végétal est souvent approximée par la température de l'air.

Nous récapitulons dans le tableau 3.3 les données acquises dans les couches constituant les milieux forestiers étudiés ainsi que leur utilisation dans le cadre de nos travaux de recherche.

Tableau 3.3. Données recueillies du couvert végétal (arbres et/ou sous-bois) et du sol (sol minéral et sol organique) durant les campagnes de mesures et leurs utilisations

			Données recueillies	Utilisations
Couches du milieu forestier	Couvert végétal	Arbres	<ul style="list-style-type: none"> - Hauteur des arbres - Températures (air) et aéroportées IRT - Constantes diélectriques, dimensions, orientations angulaires des diffuseurs (branches, feuilles et troncs) - Mesures du contenu en eau des arbres - densité 	Modélisation de l'émission du couvert végétal (arbres et/ou sous-bois)
		Sous-bois	<ul style="list-style-type: none"> - Hauteur - Dimensions des diffuseurs - Mesures gravimétriques - densité 	
	Sol minéral		<ul style="list-style-type: none"> - Humidité (sondes) - Constantes diélectriques (sondes) - Mesures gravimétriques - Températures (sondes) - Texture - Rugosité 	<ul style="list-style-type: none"> - Calibration des mesures des sondes (Theta et Hydra) - Modélisation de l'émission du sol (sol minéral + sol organique)
	Sol organique (litière et/ou humus)		<ul style="list-style-type: none"> - Mesures gravimétriques d'humidité - épaisseur 	

3.7. Profils temporels des données de température de brillance et analyse des tendances

3.7.1. Profils temporels des données de température de brillance

Cette section vise à faire une analyse qualitative, en fonction des caractéristiques des sites, des profils temporels des TB sur les différents sites et des tendances de ces dernières en fonction des données d'humidité du sol.

Les figures 3.16 et 3.17 montrent les profils temporels des mesures PALS aéroportées de TB sur les sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12. Les profils temporels des TB mesurées avec le radiomètre au sol sur les sites SF-MSA et SF-SIRENE sont illustrés respectivement sur les figures 3.18 et 3.19. Les abréviations 'xx_Mor', 'xx_Anoon' et 'xx_Eve' réfèrent respectivement aux mesures effectuées le matin, l'après-midi et en soirée, avec 'xx' étant la date de la mesure.

Concernant la campagne du SF-SIRENE, des mesures radiométriques et *in situ* du sol minéral et de la litière ont été faites le premier jour de la campagne (30 août), mais ces données n'ont pas été exploitées dans la suite des travaux, car le fichier des données radiométriques était inexploitable.

Vu la brève fenêtre temporelle des campagnes faites à Sherbrooke relativement à la campagne SMAPVEX12, dans un but d'avoir le maximum de points de données, plusieurs mesures sont faites pour une journée de campagne, à savoir le matin, l'après-midi et le soir.

L'analyse des figures 3.16, 3.17, 3.18 et 3.19 nous amène à quelques remarques. Le premier point concerne le comportement physique attendu des TB relativement aux variations de l'humidité du sol. L'augmentation des températures de brillance n'est pas toujours associée à la diminution de l'humidité du sol et vice-versa. Physiquement, le comportement en émission de la végétation et celui du sol sont inversés (Ulaby *et al.*, 1986). L'émission de la végétation (processus de volume) augmente avec l'augmentation de son contenu en eau, en raison de l'augmentation de l'émission thermique du milieu due à une absorption croissante du rayonnement par les particules d'eau (Schmugge, 1985).

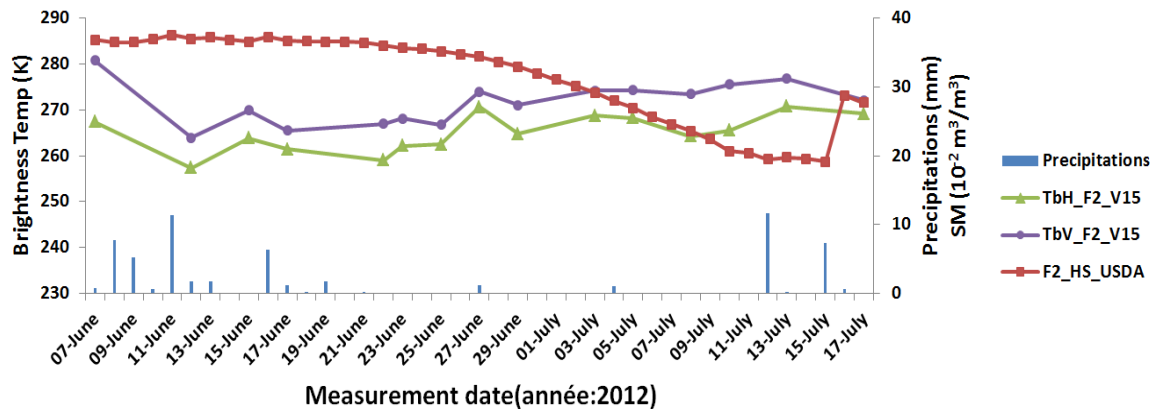


Figure 3.16. Profil temporel des TB aéroportées PALS sur le site F2 de la campagne SMAPVEX12

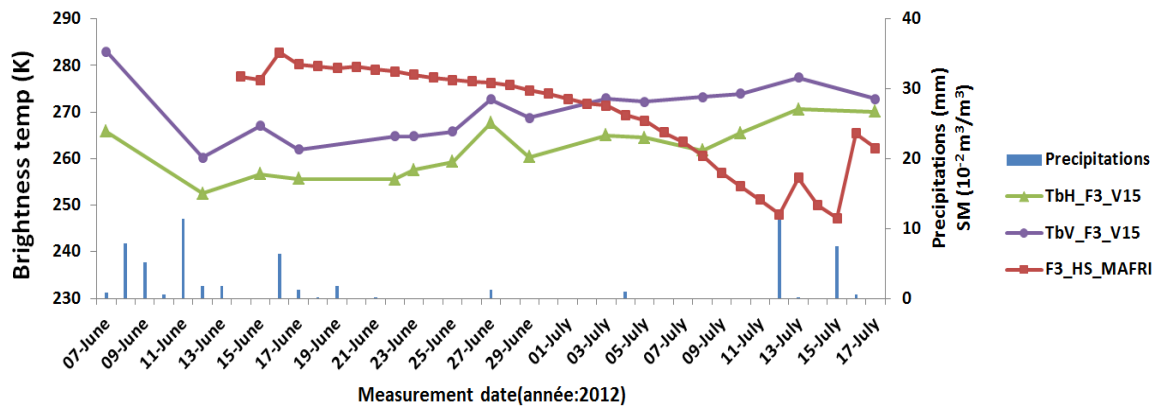


Figure 3.17. Profil temporel des TB aéroportées PALS sur le site F3 de la campagne SMAPVEX12

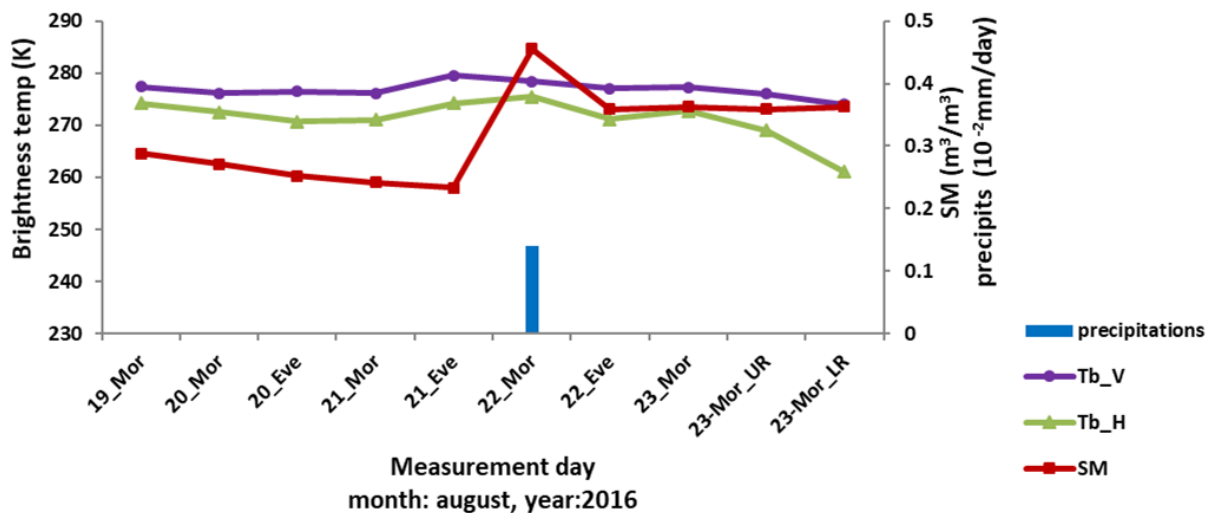


Figure 3.18. Profil temporel des TB mesurées avec le radiomètre au sol durant la campagne SF-MSA. 23-Mor-UR: mesure sans la couche de sous-bois, 23-Mor-LR: mesure sans les couches de sous-bois et de litière.

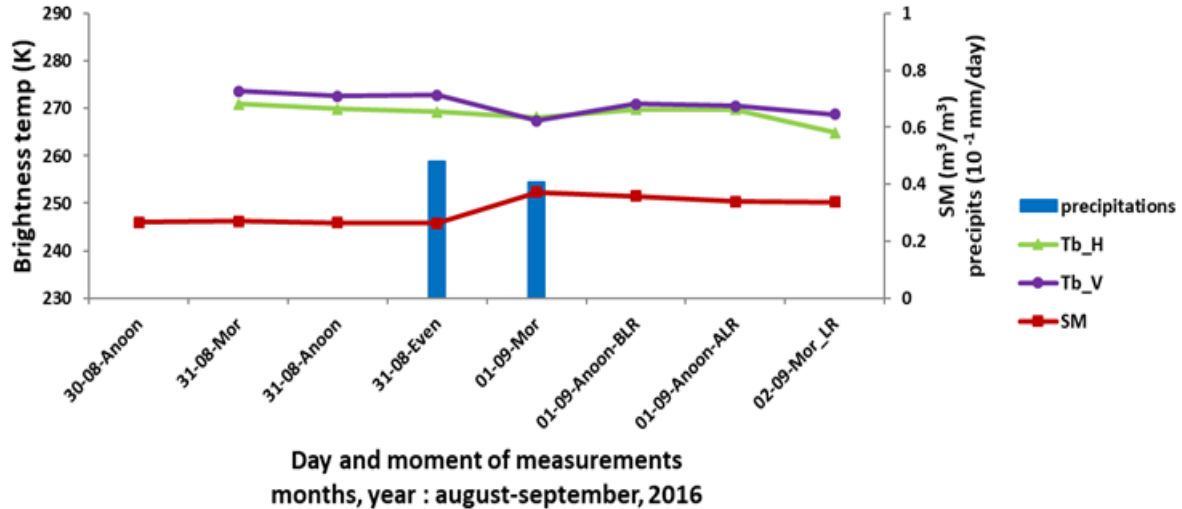


Figure 3.19. Profil temporel des TB mesurées avec le radiomètre au sol durant la campagne SF-SIRENE. 01-09-Anoon-BLR: mesure avant l'enlèvement de la litière, 01-09-Anoon-ALR: mesure juste après l'enlèvement de la couche de litière, 02-09-Mor-LR: mesures sans la couche de litière.

En revanche, l'émission du sol diminue avec l'augmentation de son contenu en eau. Ici, c'est un processus de surface qui se produit. Or, ce processus est fonction de la réflectivité du sol qui augmente avec l'humidité du sol; ce qui explique la diminution de l'émission du sol (émission du sol = 1 - réflectivité du sol) avec une augmentation de son contenu en eau. Sur les sites forestiers et les terrains couverts de végétation, ces deux phénomènes du sol et de la végétation sont combinés et difficiles à découpler.

Le deuxième point concerne l'évolution temporelle des TB. Nous remarquons que d'une manière générale, sur les sites de la campagne SMAPVEX12, les TB augmentent lentement avec la diminution de l'HS du 17 juin au 13 juillet. Ce comportement n'est pas remarqué pour ce qui est des campagnes SF-MSA et SF-SIRENE à cause du nombre limité de points de données.

Le troisième point concerne la réponse des TB par rapport aux événements de précipitations. Sur les sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12, une suite d'événements de précipitations, du début et de la fin de la campagne, ont provoqué la diminution des TB mesurées. Par contre, pour les campagnes des deux autres sites, un seul événement de précipitation avait permis de remarquer ce comportement. Ce comportement est lié à la

quantité de végétation présente sur ces sites qui influencerait l'interception des précipitations par les différentes couches des sites forestiers avant de parvenir au sol minéral. Les sites F2 (figure 3.3) et F3 (figure 3.4) ont une biomasse plus importante du couvert végétal (sous-bois et arbres) et des couches organiques plus épaisses (tableau 3.1) par rapport aux sites SF-MSA et SF-SIRENE. Ceci fait en sorte que ces sites nécessitent plus d'évènements de précipitations qui augmenteraient l'HS et diminueraient les TB.

Le dernier point concerne l'effet de l'enlèvement successif de la couche de sous-bois et de celui de la couche de litière sur les mesures radiométriques à la fin de la campagne du site SF-MSA et l'enlèvement de la couche de litière à la fin de la campagne du site SF-SIRENE. Dans le cas du site SF-MSA, l'enlèvement de la couche de litière, en conditions humides après les précipitations de la veille, a eu un impact plus important sur les données TB enregistrées, et ce particulièrement en polarisation H. L'étude expérimentale de Kurum *et al.* (2012a) avait montré que l'enlèvement de la couche de litière, sur un site forestier de conifères, provoquait quasiment la même diminution des TB mesurées au-dessus de la canopée, et ce dans les deux polarisations. Dans le cas de la campagne du site SF-SIRENE, les TB mesurées après l'enlèvement de la couche de litière n'ont pas été altérées. En bande L, les dimensions des éléments constituant la couche de sous-bois n'ont pas l'impact qu'ont les éléments de la couche dense de la végétation forestière sur l'atténuation des ondes électromagnétiques.

3.7.2. Analyse des tendances entre les températures de brillance et l'humidité du sol

Les figures 3.20 et 3.21 présentent les courbes de corrélation entre les TB et l'HS pour les trois campagnes de mesures entreprises. Ces figures montrent une bonne corrélation entre ces deux grandeurs, particulièrement en polarisation V, sur le site F3 de la campagne SMAPVEX12 et sur le site SF-SIRENE. Cette corrélation est faible pour le site F2 de la campagne SMAPVEX12 et très faible pour le site SF-MSA.

Pour nous aider à analyser ces corrélations, il faut rappeler trois aspects. Le premier concerne la nature des sites observés. Pour les deux sites de la campagne SMAPVEX12 et le site SF-SIRENE, les données radiométriques sont prises au-dessus de la canopée forestière, alors que dans le cas du site SF-MSA, les mesures radiométriques acquises sont

du sous-bois et dans lesquelles la contribution descendante de la végétation est aussi intégrée. Cette contribution est atténuée une fois par la couche de sous-bois et la litière (en conditions humides), puis réfléchiée par le sol avant d'être une deuxième fois atténuée par la couche de sous-bois et la litière pour être acquise par le radiomètre.

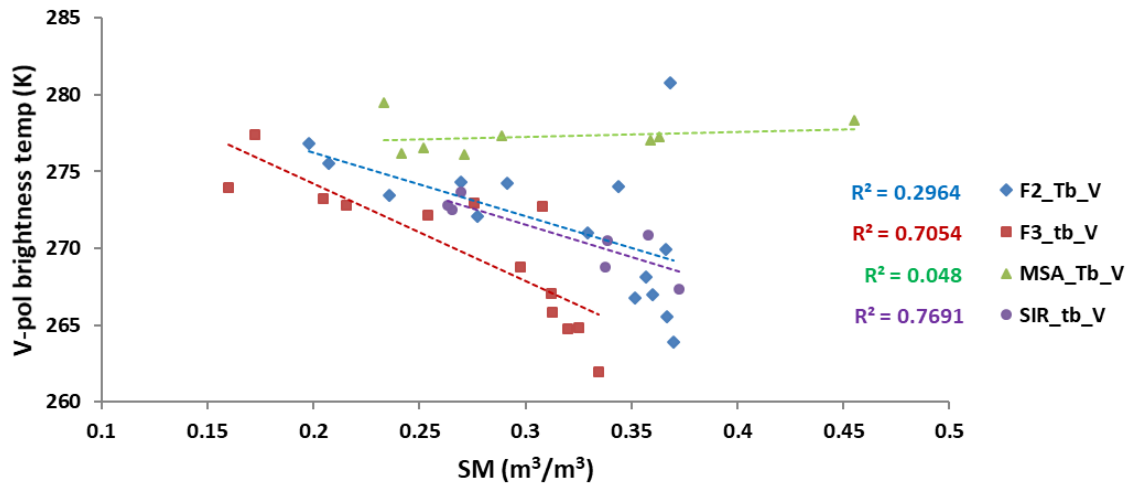


Figure 3.21. Corrélation entre les TB mesurées en polarisation V et les données d'HS sur les trois sites forestiers d'étude

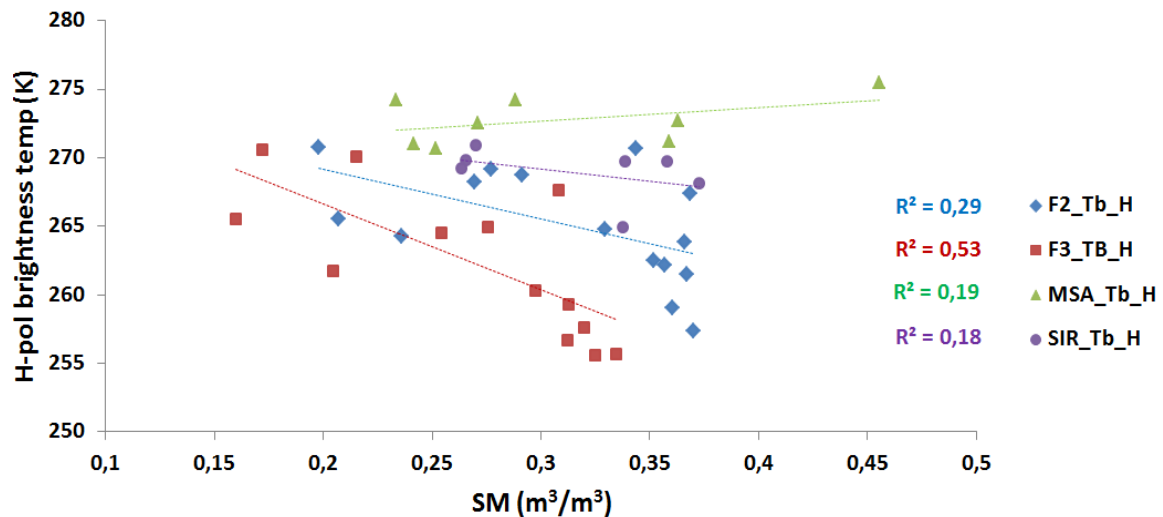


Figure 3.20. Corrélation entre les TB mesurées en polarisation H et les données d'HS sur les trois sites forestiers d'étude

Le deuxième point concerne le nombre de mesures acquises et la variabilité de l'HS durant ces trois campagnes. Nous avons une meilleure variabilité de l'HS durant la campagne

SMAPVEX12 relativement aux campagnes des sites SF-MSA et SF-SIRENE. Pour ces deux dernières campagnes, une plage temporelle et une variabilité de l'HS élargies auraient permis d'avoir de meilleures corrélations entre les TB mesurées et l'HS.

Le troisième point concerne la résolution spatiale des données observées. Les résolutions spatiales des mesures radiométriques faites durant les campagnes des sites SF-MSA et SF-SIRENE, $\sim 3 \text{ m}^2$ et $\sim 158 \text{ m}^2$ respectivement, sont plus hautes que celles des sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12, à savoir $\sim 600 \text{ m}^2$.

Ces trois points font que l'analyse de la corrélation entre les trois campagnes n'est pas à priori directe. Mais, il faut retenir la complémentarité de l'information dégagée par chaque campagne sur la caractérisation du comportement radiométrique des différentes couches constituant les milieux forestiers des sites étudiés de ces campagnes et les implications sur la possibilité d'estimer l'HS sur ce type de milieux.

Chapitre 4. Approche méthodologique

Cette section explique en détail l'approche méthodologique adoptée et illustrée sur la figure 4.1. Elle a pour but de répondre à l'objectif principal de la thèse. Celui-ci a été atteint à travers l'utilisation d'un modèle de diffusion d'ordre 1 basé sur la théorie du TR.

4.1. Évaluation du modèle de diffusion d'ordre 1 basé sur la théorie du transfert radiatif de Kurum *et al.* (2011)

L'objectif de l'évaluation du modèle de Kurum *et al.* (2011) est de valider les simulations de ce modèle par rapport aux mesures radiométriques en bande L acquises sur les trois sites forestiers d'intérêt. Dans la phase de l'évaluation, la couche de sous-bois a été prise en compte et la couche de litière a été intégrée dans le modèle. Nos travaux sont les premiers à prendre en compte la couche de sous-bois dans le modèle de Kurum *et al.* (2011). Concrètement, la couche de sous-bois a été considérée comme faisant partie de la couche végétale de la canopée forestière. Pour la couche de litière, nous avons fait appel à un modèle plus simple de réflectivité du sol forestier par rapport à d'autres modèles qui ont été utilisés dans d'autres études (Grant *et al.*, 2007; Schwank *et al.*, 2008; Kurum *et al.*, 2012a). Il s'agit du modèle cohérent de réflectivité trois-couches de sols forestiers, appelé modèle cohérent à multiples réflexions de Ulaby *et al.* (1981), expliqué dans la section 2.2.3.

Dans le processus d'évaluation du modèle de Kurum *et al.* (2011), l'impact du calcul de la constante diélectrique du sol minéral par les modèles de Dobson *et al.* (1985) et de Mironov *et al.* (2009) sur les simulations a été évalué.

4.1.1. Données utilisées dans l'évaluation du modèle de Kurum *et al.* (2011)

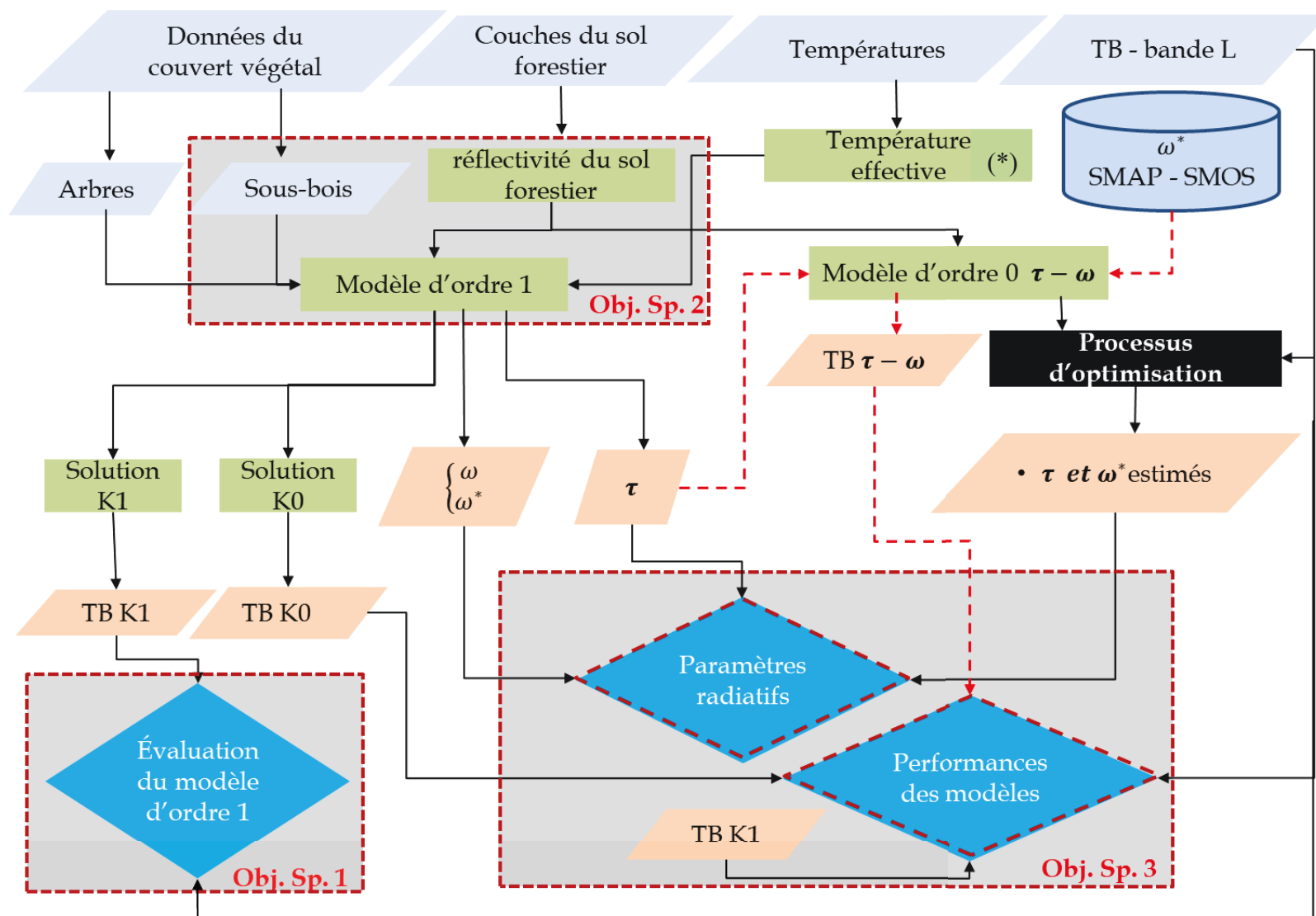
Les données ayant permis de concrétiser cet objectif sont les données de TB (section 3.3), les données du couvert végétal (section 3.4), les données du sol forestier (section 3.5) et les données de stations météorologiques, telles que les températures de l'air et les précipitations (section 3.6). Ces données sont résumées dans le tableau 3.3 à l'exception des données de TB. Le couvert végétal comprend les arbres et le sous-bois pour les sites

forestiers F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12 et le site SF-SIRENE et le sous-bois uniquement pour le cas du site SF-MSA. Le sol forestier comprend le sol minéral sur lequel est superposée une couche de litière pour les sites SF-MSA et SF-SIRENE. Concernant les sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12, une couche d'humus s'est formée en plus de la couche de litière.

Les données requises du couvert végétal sont la dimension, la densité spatiale, l'orientation et la constante diélectrique des éléments le constituant (voir section 3.4 et tableau 3.3). À l'exception des données de constantes diélectriques, ces paramètres ont été acquis en faisant un échantillonnage spatial et un échantillonnage destructif de la couche des arbres des sites forestiers F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12. Pour le site SF-SIRENE, seul un échantillonnage spatial a été mené. Par contre, pour le site SF-MSA, seul un échantillonnage destructif a été mené, car nous nous sommes intéressés uniquement à la couche de sous-bois observé et que la contribution des arbres a été mesurée séparément. À propos des données de constantes diélectriques, un équipement électronique composé d'une sonde et d'un analyseur vectoriel de spectre a été utilisé pour les mesurer sur les sites forestiers de la campagne SMAPVEX12 et le site SF-SIRENE. Pour le site SF-MSA, les constantes diélectriques des feuilles et des tiges du sous-bois ont été estimées avec un modèle de constante diélectrique de matières végétales (Ulaby et El-rayes, 1987).

Pour les sites forestiers F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12 et le site SF-SIRENE, les données des couches de sous-bois et de litière, et de la couche des arbres (troncs, branches, feuilles) ont été utilisées pour simuler les TB observées au-dessus des canopées forestières. Pour le cas du site SF-SIRENE, où des mesures radiométriques ont été faites avant et après l'enlèvement de la couche de litière, les performances du modèle trois-couches de réflectivité du sol forestier ont été évalués quant à sa capacité à simuler ces mesures de TB.

Pour ce qui est du site SF-MSA, les données des couches de sous-bois et de litière, et les données de TB mesurées en mode ascendant des arbres, ont été utilisées pour la simulation des données de TB acquises du sous-bois et du sol (litière et sol minéral) du site forestier. Aussi, dans ce cas, le modèle de réflectivité trois-couche du sol forestier a été validé pour les jours de mesures en présence et en absence (enlèvement) de la couche de litière.



(*) : sauf pour le site SF-MSA, la température effective a été calculée à partir de la solution K1

Figure 4.1. Organigramme de la démarche méthodologique adoptée

4.1.2. Calibration du paramètre effectif de rugosité h' du modèle de réflectivité du sol

Le modèle de réflectivité de sol (équation 2.20) des sites forestiers d'étude doit être calibré avec des données de TB *in situ* descendantes. Il faut noter que la majorité des études trouvées dans la littérature se sont plutôt intéressées à la caractérisation du paramètre h' sur des sols non forestiers (Martens *et al.*, 2015; Wigneron *et al.*, 2017). Nous supposons le paramètre h' indépendant de la polarisation, tel que fait dans l'algorithme d'estimation d'HS de la mission SMAP (Chan *et al.*, 2016). Le paramètre n , modélisant la dépendance de la réflectivité à l'angle d'incidence est mis à zéro, car nous n'avons que des données à un seul angle d'incidence (De Martens *et al.*, 2015).

N'ayant pas de données radiométriques du sol des sites forestiers F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12 qui auraient permis de calibrer le modèle de réflectivité du sol, le paramètre de rugosité (h) pour ces sites forestiers a été calculé (équation 2.17) avec les mesures des caractéristiques de la rugosité de la surface du sol faites sur le terrain.

Pour les sites SF-MSA et SF-SIRENE, des données de TB des sols de ces sites forestiers ont été acquises à la fin de ces deux campagnes dans le but aussi de calibrer le paramètre effectif de rugosité h' . Pour le site SF-MSA, les données de TB sont acquises après l'enlèvement de la couche de sous-bois et l'enlèvement de la couche de litière. Pour le site SF-SIRENE, les mesures sont faites après l'enlèvement de la couche de litière. Le paramètre h' étant considéré indépendant de la polarisation, les mesures de TB des polarisations H et V ont été combinées pour estimer ses valeurs en minimisant les erreurs entre les simulations de TB du sol des sites forestiers et les TB acquises par le radiomètre.

Concernant le site SF-MSA, la fonction coût de l'équation 4.1, avec N le nombre de données utilisées a été minimisée à travers un processus itératif pour estimer la valeur du paramètre effectif de rugosité h' . La mesure faite après l'enlèvement de la couche de sous-bois et celle faite après l'enlèvement de la couche de litière fournissent les quatre données, deux en polarisation H et deux en polarisation V ($N = 4$).

$$J1 = \frac{\sqrt{\sum (Tb_{H,meas} - Tb_{H,sim})^2 + (Tb_{V,meas} - Tb_{V,sim})^2}}{N} \quad 4.1$$

$Tb_{p,meas}$ et $Tb_{p,sim}$ représentent respectivement les TB mesurées et simulées. Dans la configuration d'observation du site SF-MSA, $Tb_{p,sim}$ sont obtenues avec l'équation 4.2.

$$Tb_{p,sim} = e_{sim,p} T_{eff} + \gamma_p^2 R_p Tb_{arbre,p} \quad 4.2$$

Les paramètres R_p , γ_p , $e_{sim,p}$, T_{eff} , $Tb_{arbre,p}$, p représentent respectivement la réflectivité trois-couches du sol forestier (équation 2.20), la transmissivité de la couche de sous-bois (équation 2.4), la solution K1 en émission (équation 2.8), la température effective utilisée, (équation 2.5 et 2.6) la mesure de la contribution descendante de la couche arbre (couronne des arbres) et la polarisation de l'onde électromagnétique.

Concernant le site SF-SIRENE, l'estimation de h' s'est faite en combinant les données du sol forestier (équation 4.3), dénommées $Tb_{BC,p}$, et celles prises au-dessus de la canopée forestière (équation 4.4), dénommées $Tb_{AC,p}$.

$$Tb_{BC,p} = Tb_{FF,p} + R_p Tb_{trees,p} \quad 4.3$$

$$Tb_{AC,p} = \gamma_p Tb_{FF,p} + \gamma_p R_p Tb_{trees,p} + Tb_{trees,p} \quad 4.4$$

$Tb_{FF,p}$, $Tb_{trees,p}$, γ_p , R_p et p représentent respectivement la contribution du sol forestier, la contribution de la couche des arbres et du sous-bois, la transmissivité de la couche des arbres et du sous-bois, la réflectivité deux-couches (air, sol minéral) du sol forestier et la polarisation de l'onde électromagnétique. $Tb_{FF,p}$ est exprimée en fonction de l'émissivité du sol forestier $(1 - R_p)$ et de la température physique du sol $T_{S,5cm-d}$, mesurée à 5 cm de profondeur.

Dans les équations 4.3 et 4.4, $Tb_{trees,p}$ est la seule quantité inconnue, γ_p et R_p sont calculées physiquement. Le paramètre γ_p est calculée en combinant les équations 2.4 et 2.11. Les équations 4.3 et 4.4 peuvent être reformulées selon les équations 4.5 et 4.6 en

dégageant $Tb_{trees,p}$.

Le paramètre de rugosité effectif h' est estimée en utilisant la fonction coût $J2$ (4.7) minimisant l'écart entre les deux quantités $Tb_{trees,p}$ (équations 4.5 et 4.6), avec $N=2$, une donnée pour chaque polarisation. Trois mesures consécutives de TB bipolarisée (H et V) ont été acquises après l'enlèvement de la couche de litière. $Tb_{BC,p}$ représente la moyenne en polarisation H et en polarisation V de ces trois mesures. $Tb_{AC,p}$ est la mesure faite au-dessus de la canopée forestière juste avant les mesures $Tb_{BC,p}$. L'impact du calcul de la constante diélectrique du sol minéral, calculée par les modèles de Dobson *et al.* (1985) et de Mironov *et al.* (2009), sur le processus de calibration du paramètre effectif de rugosité h' , a été évalué.

$$Tb_{trees,p} = \frac{Tb_{BC,p} - (1 - R_p)T_{S,5cm-d}}{R_p} \quad 4.5$$

$$Tb_{trees,p} = \frac{Tb_{AC,p} - \gamma_p Tb_{FF,p}}{(1 + \gamma_p R_p)} \quad 4.6$$

$$J2 = \frac{\sqrt{\sum(a_H^2 + a_V^2)}}{N}, \text{ avec } N = 2 \quad 4.7$$

$$a_H = Tb_{trees,H}(\text{éq 4.5}) - Tb_{trees,H}(\text{éq 4.6}) \quad 4.8$$

$$a_V = Tb_{trees,V}(\text{éq 4.5}) - Tb_{trees,V}(\text{éq 4.6}) \quad 4.9$$

Un autre aspect important dans l'évaluation du modèle Kurum *et al.* (2011) est le paramétrage de la température physique effective de ce type de milieux. Intuitivement, cette température effective devrait être exprimée en fonction des températures effectives du sol et de la végétation. La formulation physique de cette température effective n'est pas connue.

4.1.3. Détermination de la température effective du milieu sol-couvert végétal (arbres et/ou sous-bois)

En situation d'équilibre thermique entre le sol et le couvert végétal, la température effective du milieu sol-couvert forestier peut être prise égale à la température effective de ces deux couches. Dans le cas inverse, deux options sont à explorer. Précisément, ce cas concerne la campagne du site SF-MSA. Comme première option, la température effective du milieu peut être approximée par l'équation 2.6 (Wigneron *et al.*, 2007). Elle est exprimée en fonction des températures effectives du sol et du couvert végétal et de la transmissivité de ce dernier. Même avec l'approximation de l'équation 2.6, des erreurs importantes de simulations ont été observées. Comme deuxième option, le paramètre B_t de cette équation peut être estimé en minimisant les erreurs entre les TB acquises et les simulations, tout en s'assurant que la valeur de ce paramètre B_t garantisse le sens physique donné à l'équation 2.6, tel qu'expliqué dans la section 2.1.1. Pour ce faire, la fonction coût $J3$ de l'équation 4.10 a été utilisée, avec $N=7$ le nombre de points de données utilisées. $Tb_{p,meas}$ et $Tb_{p,sim}$ représentent respectivement les TB mesurés et simulés par la solution K1 du modèle de Kurum *et al.* (2011) pour une polarisation donnée p de l'onde électromagnétique. Si la valeur de B_t estimée ne garantit pas le sens physique de l'équation 2.6, une dernière option est envisageable.

$$J3_p = \frac{\sqrt{\sum (Tb_{p,meas} - Tb_{p,sim})^2}}{N} \quad 4.10$$

La température effective du milieu peut être elle-même estimée en minimisant les erreurs entre les TB simulées en polarisation H ou en polarisation V et les TB acquises du couvert végétal. Pour ce faire, la fonction coût $J4$ de l'équation 4.11 a été utilisée, avec $N=7$ pour chaque polarisation. À partir d'une valeur initiale de température effective injectée dans l'équation 4.2, la fonction $J4$ est évaluée de façon itérative en incrémentant la valeur de la

température effective initiale jusqu'à avoir l'erreur optimale.

$$J_{4p} = \frac{\sqrt{\sum (Tb_{p,meas} - Tb_{p,sim})^2}}{N} \quad 4.11$$

Pour expliquer le sens physique des températures effectives obtenues par l'équation 4.11, une étude de corrélation a été menée entre ces températures effectives et les températures du sol et du couvert végétal (température de l'air).

4.2. Étude de l'influence des couches de sous-bois et de la litière en prenant en compte leurs contributions dans le modèle de transfert radiatif d'ordre 1

Les données dont nous disposons des couches du sol forestier nous amènent à considérer trois couches dans le modèle cohérent à multiples réflexions. Concernant les sites SF-MSA et SF-SIRENE, les trois couches font référence à la couche de sol minéral, la couche de litière et la couche d'air. Concernant les sites forestiers F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12, les contenus en eau des couches de litière et d'humus n'ont pas été mesurés séparément. De ce fait, pour des objectifs de modélisation, ces deux couches ont été considérées comme une seule couche organique (humus).

Les données d'entrée du modèle cohérent à multiples réflexions du sol forestier incluent les constantes diélectriques des trois couches et l'épaisseur de la couche intermédiaire (équation 2.19). Concernant la constante diélectrique du sol minéral, les modèles de Dobson *et al.* (1985) et le modèle de Mironov *et al.* (2009) ont été utilisés. Pour ce qui est de la couche de litière des sites SF-MSA et SF-SIRENE, l'approche proposée par Della Vecchia *et al.* (2007) pour le calcul de la constante diélectrique de la couche de litière a été utilisée. Cette approche fait appel au modèle de mélange diélectrique présenté dans Ulaby *et al.* (1986). Pour les sites forestiers F2 et F3 de SMAPVEX12, les équations de calibration de Schaap (1997) ont été exploitées pour le calcul de la constante diélectrique de la couche d'humus (équation 2.31).

Pour modéliser la contribution de la couche de sous-bois, les données la concernant ont été ajoutées à la couche des arbres comme si elle faisait partie de celle-ci (voir schéma de la figure 2.2). Pour les sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12 et le site SF-SIRENE,

cette couche est majoritairement constituée de petits arbres. Les mesures de constantes diélectriques n'ont pas été faites sur les éléments de cette couche. Les constantes diélectriques mesurées des branches leur ont été attribuées. En effet, les dimensions des troncs de ces petits arbres sont proches des branches secondaires. Concernant la couche de sous-bois du site SF-MSA, il est composé de tiges fines et de feuilles. Les constantes diélectriques de ces composantes sont estimées avec le modèle de Ulaby et Elrayes (1987). Pour ce site, seule la couche de sous-bois est considérée dans la modélisation parce que c'est la seule couche observée directement par le radiomètre (voir schéma de la figure 3.7).

4.3. Analyse des performances du modèle d'ordre 1 de Kurum *et al.* (2011) et du modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0 et comparaison des propriétés radiatives (τ et ω) des couverts forestiers découlant de ces deux modèles

Il faut rappeler à ce niveau que l'application du modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0 sur des couverts forestiers n'est pas directe, car ce modèle ne modélise pas les diffusions importantes se produisant dans ce type de milieu (Ferrazzoli *et al.*, 2002; Kurum *et al.*, 2012b). Toutefois, sur ce type de couverture végétale, il est possible de l'utiliser à condition de définir des paramètres τ et ω effectifs (Ferrazzoli *et al.*, 2002; Kurum *et al.*, 2012b). Les valeurs de ces deux paramètres effectifs peuvent être estimées à partir d'un processus d'optimisation et des mesures de TB. De là, l'albédo effectif optimisé n'est plus un albédo de simple diffusion (ω), mais un albédo effectif (ω^*). Théoriquement, ω tient uniquement compte des paramètres du couvert végétal, tels que le contenu en eau du couvert végétal forestier et les aspects géométriques des éléments le constituant. Par contre ω^* tient compte de la diffusion multiple se produisant dans un milieu forestier, des paramètres du couvert végétal forestier et de ceux du sol (Kurum *et al.*, 2012b). Le modèle de Kurum *et al.* (2011) a l'avantage de calculer théoriquement les paramètres radiatifs ω (équations 2.3 et 2.9), τ (équations 2.4 et 2.11), ainsi que ω^* (équation 2.13). Ce calcul théorique permet d'informer sur l'ordre de grandeur de ces paramètres ainsi que leur dépendance vis-à-vis de la polarisation de l'onde électromagnétique.

Le calcul théorique des paramètres ω , ω^* et τ par le modèle de Kurum *et al.* (2011) suggère la dépendance de ces paramètres par rapport à la polarisation de l'onde électromagnétique.

Ceci nous a amené à estimer les paramètres radiatifs effectifs de ce modèle τ et ω^* pour chaque site forestier étudié à travers un processus d'optimisation minimisant les erreurs entre les simulations de ce modèle et les TB acquises sur chaque forestier. La fonction coût utilisée pour l'estimation de ces paramètres effectifs est donnée par l'équation 4.12.

$$J5_p = \frac{\sqrt{\sum (Tb_{p,meas} - Tb_{p,sim})^2}}{N} \quad 4.12$$

$Tb_{p,meas}$ et $Tb_{p,sim}$ représentent respectivement les TB mesurées et simulées par la solution K1 du modèle de Kurum *et al.* (2011) sur chaque site forestier, pour une polarisation donnée p de l'onde électromagnétique. N est le nombre de points de données utilisées pour chaque polarisation. Pour les sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12, $N=11$ pour chaque polarisation. Pour les campagnes SF-MSA et SF-SIRENE, $N=7$ pour chaque polarisation.

Cette partie de la thèse a deux finalités. Pour chaque site forestier, la première finalité a pour but de comparer les paramètres effectifs τ et ω^* estimés par la fonction coût $J5_p$ avec les paramètres τ et ω^* calculés théoriquement par le modèle de Kurum *et al.* (2011). La comparaison est faite dans le but de montrer le sens physique des paramètres τ et ω^* issus du processus d'optimisation. Une autre comparaison a été menée entre les paramètres radiatifs ω^* calculés théoriquement et ceux utilisés pour des couverts forestiers dans le cadre des missions satellitaires SMAP et SMOS. Les simulations de TB de la solution K0 (diffusion d'ordre 0) du modèle de Kurum *et al.* (2011) seront comparées avec celles du modèle semi-empirique $\tau - \omega$ d'ordre 0. Les simulations du modèle $\tau - \omega$ ont été obtenues en injectant la valeur d'albédo effectif ω^* utilisée par la mission SMAP pour les couverts forestiers et les arbustes et les valeurs de τ calculées théoriquement par le modèle de Kurum *et al.* (2011). Cette comparaison est menée dans le but de montrer la différence entre ω de la solution K0 et ω^* du modèle $\tau - \omega$ à travers la comparaison des simulations respectives de ces modèles. Cela va se faire en faisant le parallèle entre les valeurs estimées de ω^* et les valeurs théoriques simulées par la solution K1 (diffusion d'ordre 1) du modèle de Kurum *et al.* (2011).

La deuxième finalité est dédiée à la comparaison des performances de la solution K1 et le modèle $\tau - \omega$ en termes d'erreurs de simulations par rapport aux mesures radiométriques collectées sur les trois sites d'intérêt. Pour les deux finalités de cette étape méthodologique, l'impact des modèles de constante diélectrique de Dobson *et al.* (1985) et de Mironov *et al.* (2009) a été évalué pour voir lequel permettait d'avoir des erreurs minimales.

L'analyse des données de TB acquises sur les différents sites forestiers étudiés et les résultats de simulations obtenus ont été combinés pour tirer des conclusions quant au potentiel d'estimation de l'HS à partir des données MOP en bande L. Ces conclusions sont tirées par rapport aux conditions d'observation des sites forestiers d'étude.

Chapitre 5. Résultats et discussions

Ce chapitre est dédié à la présentation des résultats des travaux de recherche entrepris. Ils seront présentés selon l'ordre des étapes décrites dans le chapitre de la méthodologie et selon l'ordre chronologique des campagnes de terrain. Les résultats de l'objectif spécifique 2, portant sur la prise en compte de la couche de sous-bois et l'intégration de la couche de litière dans le modèle de Kurum *et al.* (2011), font partie intégrante de l'évaluation du modèle de Kurum *et al.* (2011). De ce fait, les résultats et les discussions liés à l'objectif spécifique 2 seront intégrés dans la section 5.1 de ce chapitre.

5.1. Évaluation du modèle de diffusion d'ordre 1 basé sur la théorie du transfert radiatif de Kurum *et al.* (2011)

5.1.1. Résultats de la campagne SMAPVEX12

Avant de présenter les résultats de simulations, nous présentons à titre de rappel dans les figures 5.1 et 5.2, les profils temporels des TB aéroportées de PALS acquises respectivement sur les sites F2 et F3 avec les données de températures physiques recueillies. Les figures 5.1 et 5.2 présentent un nombre inférieur de points d'acquisition radiométrique par rapport aux profils temporels des figures 3.16 et 3.17. La raison est que sur les figures 5.1 et 5.2, les points de données de TB retenus sont ceux qui correspondent à la disponibilité de mesures gravimétriques du sol organique (litière et humus). Les données de températures incluent les températures physiques du sol minéral, les mesures aéroportées (IRT) des couverts forestiers et les températures de l'air. Les températures physiques du sol sont prises aux profondeurs 0, 5 et 10 cm à partir de la surface du sol. Les températures IRT sont acquises simultanément avec les mesures de TB du radiomètre PALS. Les températures de l'air sont enregistrées par la station météorologique la plus proche des deux sites, à savoir la station *Portage Southport* d'Environnement Canada.

Les figures 5.1 et 5.2 montrent d'une part une très faible variation entre les températures du sol aux différentes profondeurs de mesures. D'autre part, ces températures physiques du sol sont très proches des températures IRT du couvert forestier des deux sites.

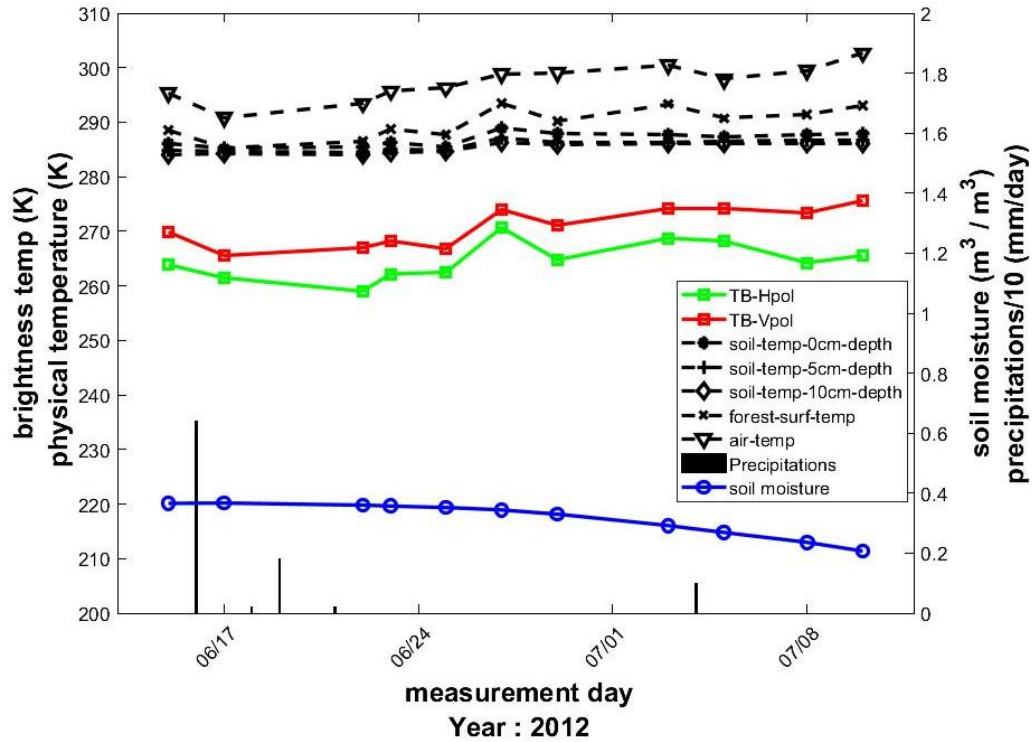


Figure 5.1. Profils temporels des TB aéroportées PALS et des températures physiques mesurées du sol (0, 5, 10 cm de profondeur), de l'air et du couvert forestier (IRT) sur le site F2 de la campagne SMAPVEX12

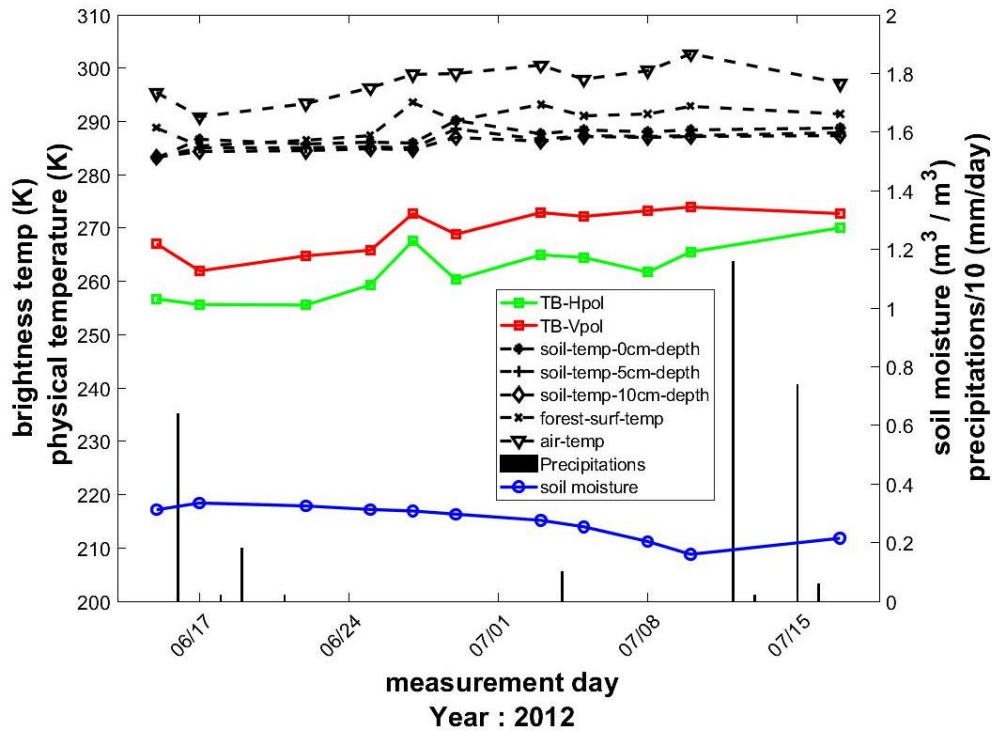


Figure 5.2. Profils temporels des TB aéroportées PALS et des températures physiques mesurées du sol (0, 5, 10 cm de profondeur), de l'air et du couvert forestier (IRT) sur le site F3 de la campagne SMAPVEX12

C'est le cas particulièrement pour les quatre premiers jours de mesures. Ceci indique un certain équilibre thermique pour ces premiers jours de mesures. Cet équilibre thermique est moins préservé pour les jours suivants où un petit écart est observé entre les températures du sol et les températures du couvert forestier. Quant aux températures de l'air, elles sont largement supérieures aux températures du sol et à celles du couvert forestier. Ceci s'expliquerait par la distance ($\sim 8 - 9$ km) séparant les sites d'étude et la station Portage SouthPort enregistrant ces températures de l'air.

Pour les objectifs de modélisation, il a été opportun de faire une étude de corrélation des TB acquises avec les températures du sol mesurées à 5 cm de profondeur et les températures IRT du couvert forestier et les températures de l'air. Les Figures 5.3 et 5.4 illustrent les résultats de corrélation obtenus respectivement sur le site F2 et le site F3.

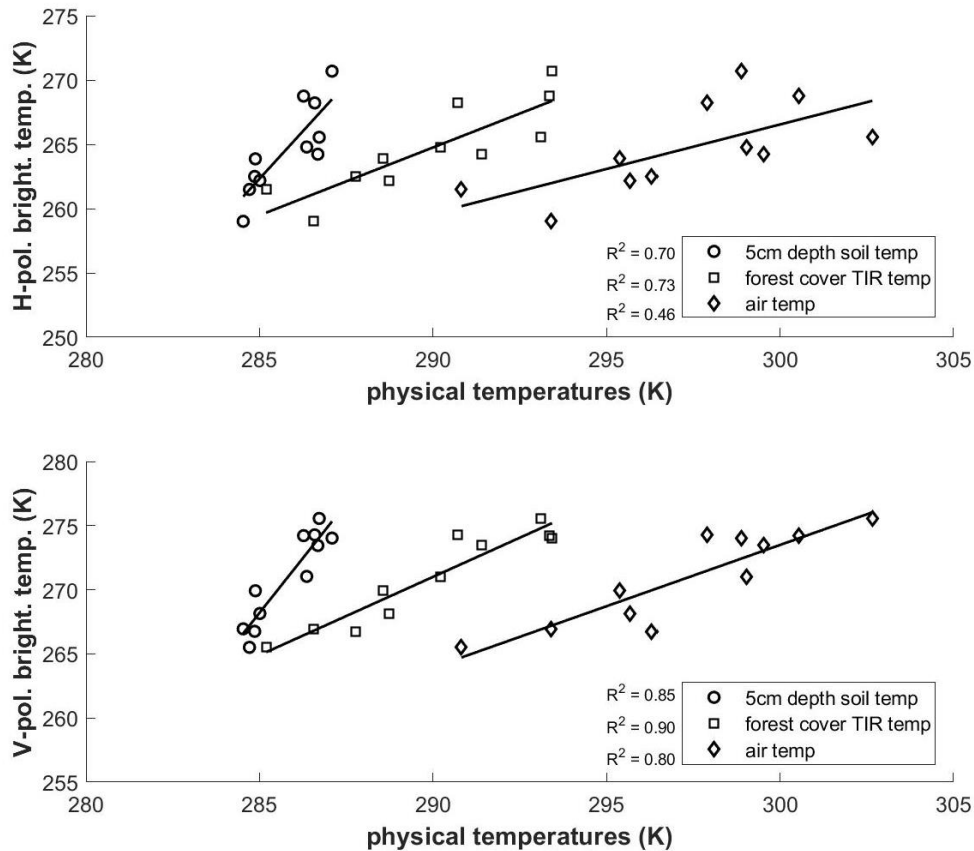


Figure 5.3. Corrélations des TB en polarisations H et V acquises sur le site F2 avec les mesures des températures physiques du sol (5 cm de profondeur), de l'air et du couvert forestier (IRT)

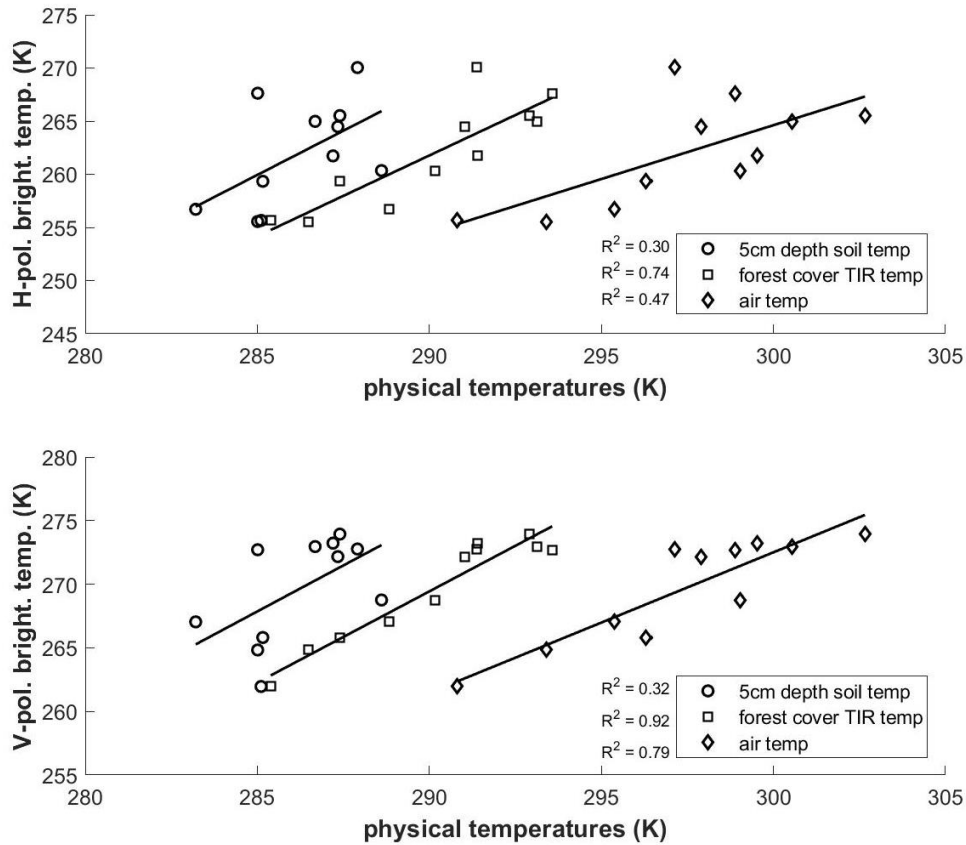


Figure 5.4. Corrélations des TB en polarisations H et V acquises sur le site F3 avec les mesures des températures physiques du sol (5 cm de profondeur), de l'air et du couvert forestier (IRT)

Les figures 5.3 et 5.4 montrent que les TB en polarisations H et V, et pour les deux sites F2 et F3, sont très corrélées avec les températures IRT du couvert forestier. Des corrélations importantes sont obtenues aussi avec les températures du sol à 5 cm de profondeur pour le cas du site F2. L'écart important entre les deux jeux de données de températures du sol et du couvert forestier (IRT) avec le jeu de mesures des températures de l'air nous a conduit à ne pas considérer ces dernières dans les travaux de modélisation, malgré les corrélations importantes obtenues avec les TB en polarisation V particulièrement.

Nous présentons sur les figures 5.5 et 5.6 l'allure des réflectivités en fonction de l'angle d'incidence et pour des conditions d'HS respectives des sols des sites forestiers F2 et F3. Les constantes diélectriques du sol minéral sont calculées avec les modèles de Dobson *et al.* (1985) et Mironov *et al.* (2009). Elles sont illustrées sur la figure 5.7. La constante

diélectrique de la couche de sol organique (litière et d'humus considérées comme une seule couche) est calculée avec l'équation 2.31. L'épaisseur moyenne de la couche organique pour le site F2 est de 4,1 cm et 2,4 cm pour le site F3.

Les figures 5.5 et 5.6 montrent d'une part que la constante diélectrique du sol minéral, calculée par le modèle de Dobson *et al.* (1985) ou le modèle de Mironov *et al.* (2009), a un effet très minime sur les réflectivités d'un sol forestier deux-couches ou d'un sol forestier trois-couches, selon les paramètres mesurés des sites F2 et F3. Pour le cas des sites F2 et F3, même avec une teneur en sable supérieure à 50 % (figures 5.5 à 5.7), le modèle de Dobson *et al.* (1985) prédit des valeurs de constantes diélectriques très proches de celle prédites par le modèle de Mironov *et al.* (2009). Les erreurs de prédiction du modèle de Dobson *et al.* (1985) ne sont pas uniquement dues à la texture du sol. Aussi, pour une texture donnée de sol, des erreurs de prédiction peuvent se manifester dans une plage particulière de fréquences (Mironov *et al.*, 2009).

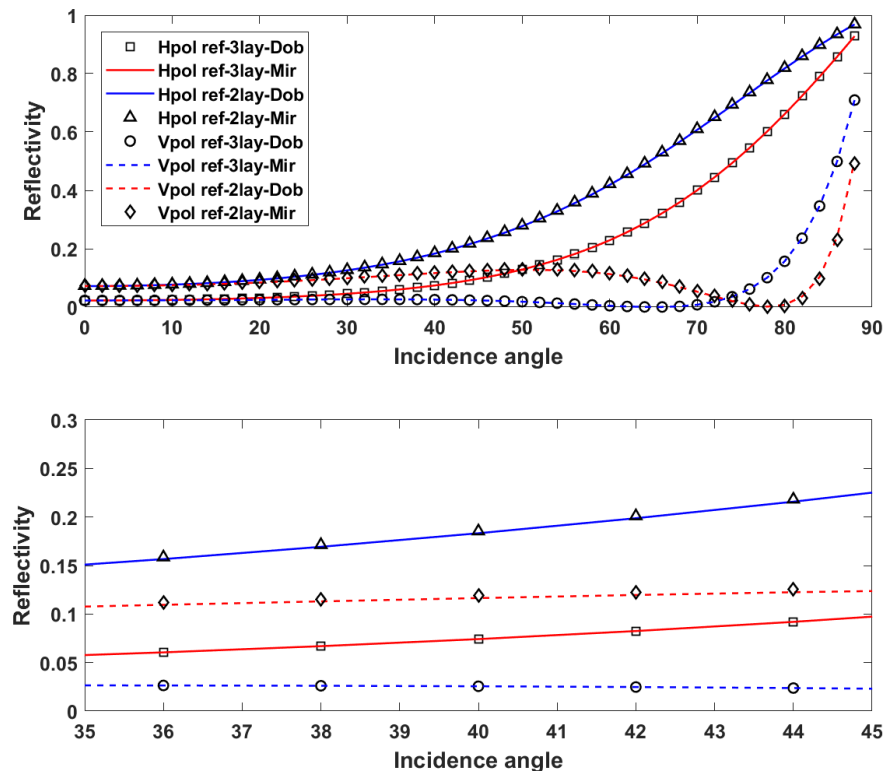


Figure 5.5. Panneau du haut: comparaison des réflectivités trois-couches (sol minéral, sol organique, air) et deux-couches (sol minéral, air) du sol forestier du site F2. Panneau du bas: zoom du panneau du haut autour de l'angle d'incidence d'intérêt (40°).

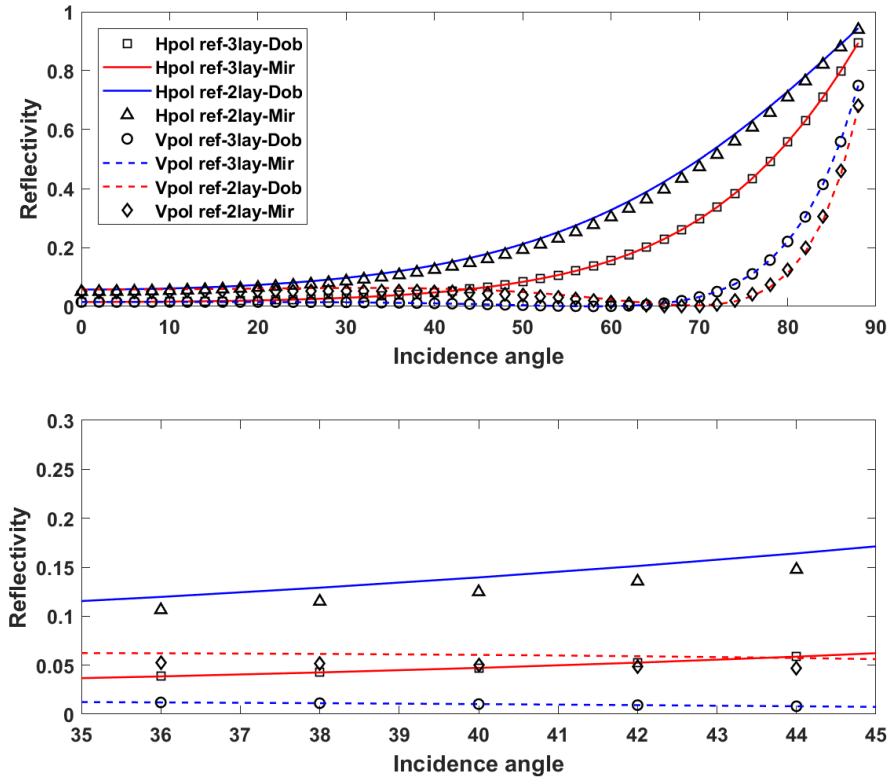


Figure 5.6. Panneau du haut: comparaison des réflectivités trois-couches (sol minéral, sol organique, air) et deux-couches (sol minéral, air) du sol forestier du site F3. Panneau du bas: zoom du panneau du haut autour de l'angle d'incidence d'intérêt (40°).

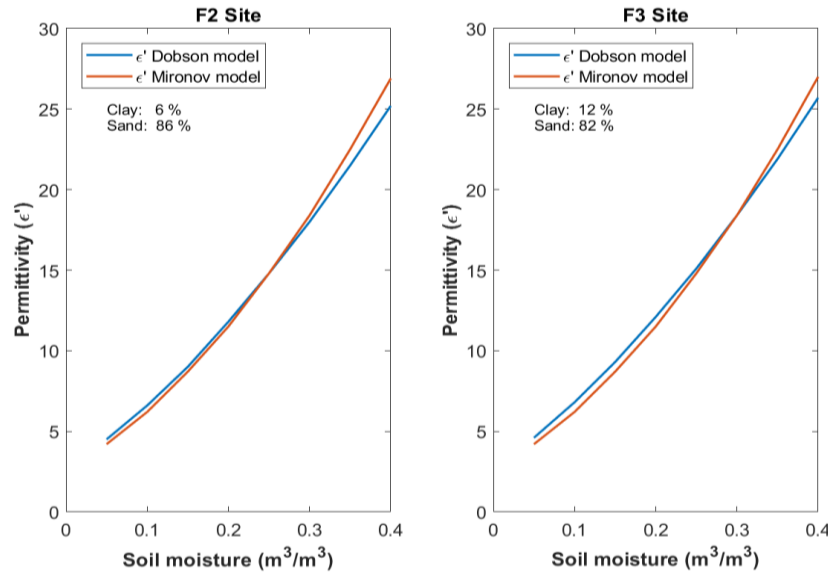


Figure 5.7. Comparaison des permittivités du sol minéral des sites forestiers F2 et F3 calculées avec le modèle de Dobson *et al.* (1985) et le modèle de Mironov *et al.* (2009)

En faisant des estimations de l'HS, Srivastava *et al* (2015) avaient conclu que l'utilisation de ces deux modèles donnait des résultats d'estimation similaires. D'autre part, les figures 5.5 et 5.6 montrent que la réflectivité trois-couches (présence de couche organique) de ces sols forestiers est inférieure à la réflectivité deux-couches (absence de couche organique). Ceci est dû à l'absorption que subit le signal dans la couche de sol organique (litière et humus). Ce phénomène est plus accentué quand la couche de sol organique est plus humide (Schwank *et al.*, 2008).

Les figures 5.8 et 5.9 illustrent les résultats de simulation du modèle de Kurum *et al.* (2011) obtenus sur les sites F2 et F3. Dans ces simulations, la couche de sous-bois a été prise en compte et la couche de sol organique (litière et humus) a été intégrée dans le modèle de Kurum *et al.* (2011). Les données d'entrée des simulations sont fournies dans les tableaux 3 et 4 de l'annexe. La température effective du sol et de la végétation est prise égale à la température aéroportée IRT des couverts forestiers des sites F2 et F3 vu les corrélations obtenues des TB mesurées avec cette température (voir figures 5.3 et 5.4).

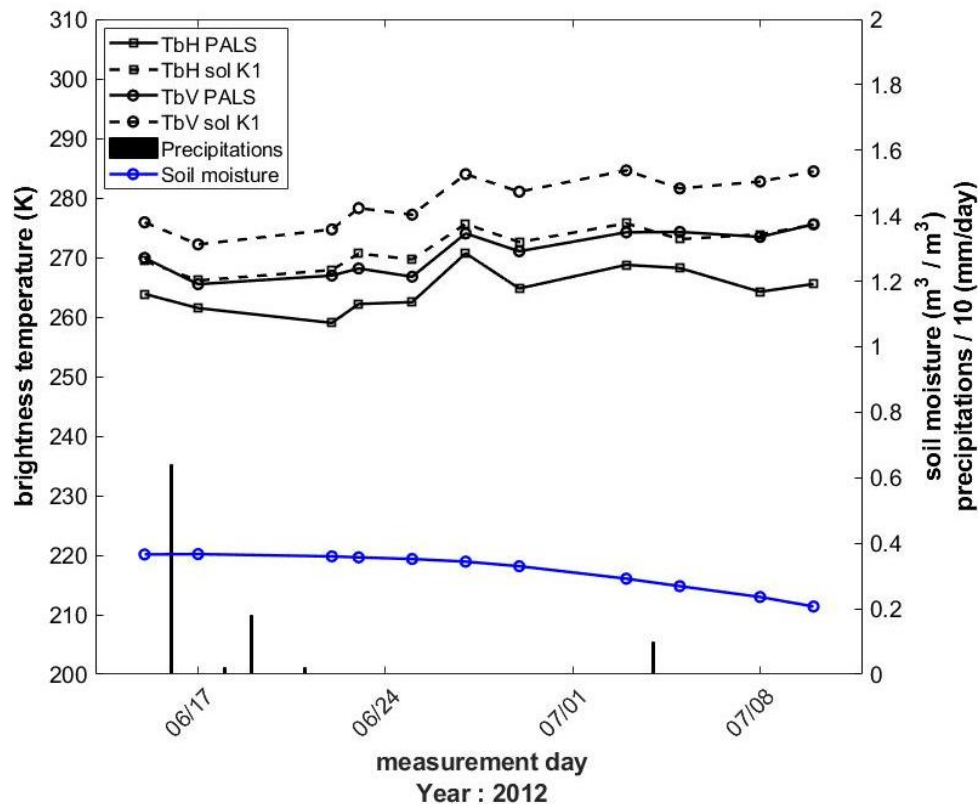


Figure 5.8. Comparaison des observations de PALS (H et V) sur le site F2 avec les simulations obtenues avec la solution K1 du modèle de Kurum *et al.* (2011)

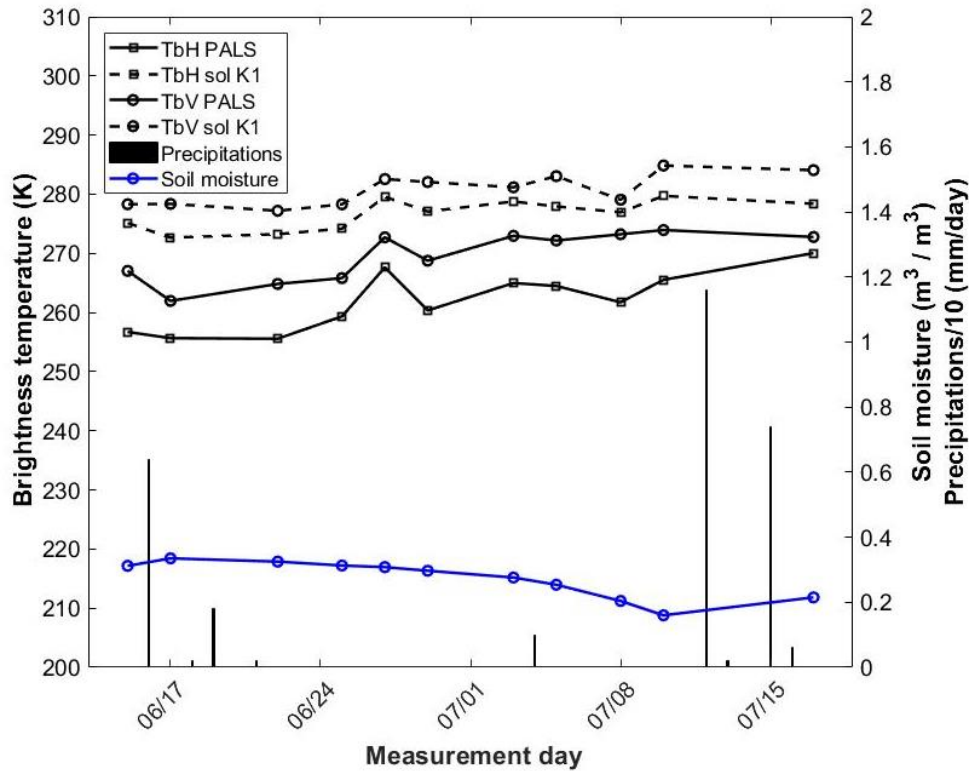


Figure 5.9. Comparaison des observations de PALS (H et V) sur le site F3 avec les simulations obtenues avec la solution K1 du modèle de Kurum *et al.* (2011)

Deux remarques sont à faire concernant les simulations de la solution K1 (figures 5.8 et 5.9) du modèle de kurum *et al.* (2011). Premièrement, pour les deux sites F2 et F3, elles surestiment les observations de PALS et ce pour les deux polarisations. Ces surestimations auraient bien pu être réduites si des mesures radiométriques caractérisant l'émission du sol des sites forestiers F2 et F3 avaient été acquises tel que fait dans le cadre des campagnes SF-MSA et SF-SIRENE. Ces mesures auraient permis de faire la calibration du modèle de réflectivité trois-couches du sol de ses sites forestiers. Une autre source d'erreur peut aussi expliquer ces erreurs de simulations. Un seul échantillon de sol organique a été collecté dans la surface circulaire représentative de chaque site à cause du manque de ressources (McNairn *et al.*, 2015). Un seul échantillon ne reflète pas tout à fait la variabilité du contenu en eau de la couche de sol organique par rapport à l'empreinte au sol du radiomètre PALS. Dans le plan de la campagne, neuf échantillons devaient être collecté tel que fait pour la collecte des échantillons de sol minéral et la mesure de l'HS par les sondes Hydra (McNairn *et al.*, 2015).

Deuxièmement, de manière générale, elles reproduisent le comportement radiométrique du capteur PALS. Les erreurs statistiques associées à ces simulations sont données dans le tableau 5.1 qui montre de meilleurs résultats de simulation en polarisation V pour le site F3 et l'inverse pour le site F2. Sur le site F2, les valeurs de RMSE sont assez proches des erreurs de calibration du radiomètre (~ 2 K, Section 3.3)

Des simulations ont aussi été faites sans la prise en compte de la couche de sous-bois. Sur le site F2, l'absence de cette couche n'a aucun effet sur les simulations. Sur le site F3, son absence a permis de déceler une très faible augmentation de la transmissivité du couvert forestier (arbres), mais qui n'a aucun effet sur les TB simulées.

Tableau 5.1. Erreur de simulation (litière et sous-bois inclus) de la solution K1 du modèle de Kurum, *et al.* (2011) sur les sites F2 et F3

	RMSE (K)		biais (K)	
	H-pol	V-pol	H-pol	V-pol
F2 site	2,23	2,69	7,16	8,80
F3 site	4,50	3,45	14,69	11,16

5.1.2. Résultats de la campagne du collège Mont-Ste-Anne

Nous rappelons dans la figure 5.10 le profil temporel des données de TB recueillies sur ce site avec les données de température de l'air de la station SIRENE, distante de 680 m du site d'étude SF-MSA, et les données d'humidité du sol minéral enregistrées par les sondes Decagon. La figure 5.10 montre aussi les mesures de TB du radiomètre obtenues après avoir enlevé la couche de sous-bois (point abscisse : 23-08-no-unders), et la couche de litière (point abscisse : 23-08-no-litter) présentes dans l'empreinte au sol du radiomètre. Sur la figure 5.10, un point d'acquisition radiométrique (20-08-Mor) n'y est pas représenté à cause de la perte de l'échantillon de la couche de litière collecté et dédié aux mesures gravimétriques.

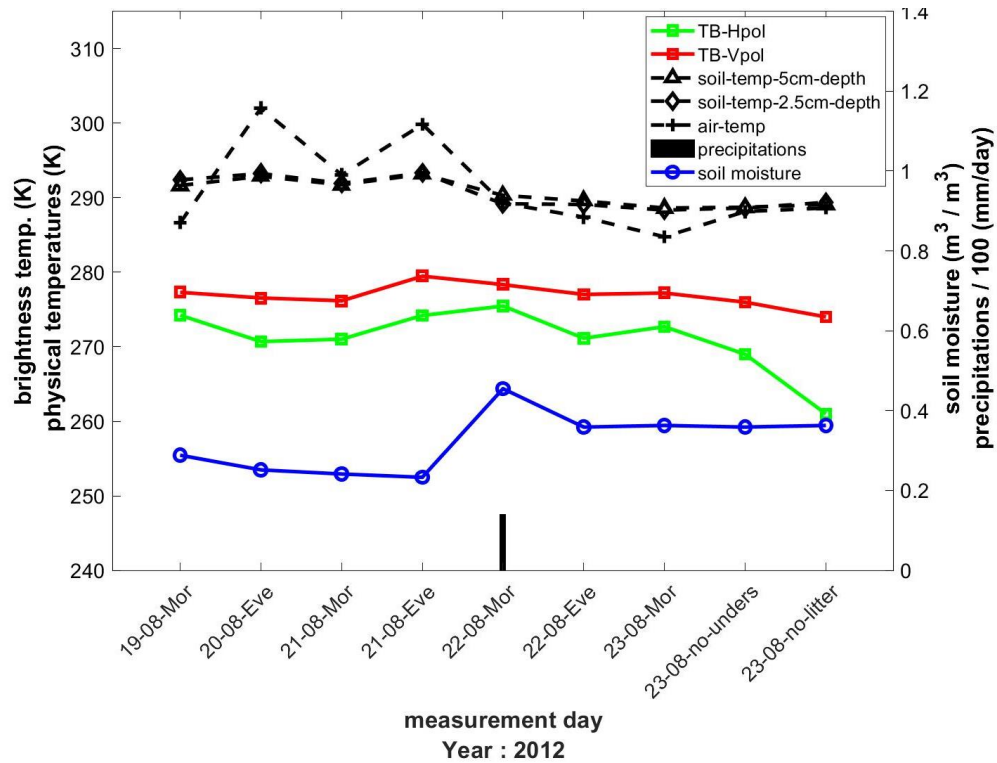


Figure 5.10. Profils temporels des TB et températures physiques mesurées du sol (2,5 et 5 cm de profondeur) et de l'air sur le site SF-MSA

Nous remarquons sur la figure 5.10 la variabilité de la température de l'air relativement à celles du sol à 5 et 2,5 cm de profondeur. Les températures du sol sont quasiment identiques et ne variaient presque pas durant toute la campagne de mesure. Durant les jours de mesures matinales, les différences entre les températures du sol et les températures de l'air sont très faibles, à l'exception du premier jour de mesure. Ce constat n'est pas observé pour les mesures de l'après-midi. Il faut préciser que les acquisitions radiométriques de l'après-midi se sont faites quasiment en fin de l'après-midi et en début de soirée.

La figure 5.10 montre une diminution des TB suite à l'enlèvement de la couche de sous-bois, puis de la couche de litière. Cette diminution est plus importante en polarisation H qu'en polarisation V. De plus, elle est plus accentuée lors de l'enlèvement de la couche de litière que lors de l'enlèvement de la couche de sous-bois. La polarisation V étant plus sensible aux structures verticales et aux éléments d'une canopée ayant des dimensions similaires à la longueur d'onde (~ 20 cm) en bande L, l'effet de l'enlèvement de la couche

de litière et de la couche de sous-bois n'est pas très prononcé. En revanche, l'enlèvement de ces deux couches est plus prononcé en polarisation H, car cette polarisation est plus sensible à la surface du sol et à l'HS (Jackson, 1993).

Comparée à la campagne de SMAPVEX12, la campagne SF-MSA présente trois particularités. La première concerne le nombre de points de données acquises. Ce nombre est limité pour entreprendre une étude de corrélation des TB avec les données de températures physiques du sol et de l'air. La deuxième concerne les différences importantes entre les températures du sol et de l'air pour les mesures du soir et qui soulèvent la question de la formulation d'une température effective du milieu observé. Cette température est requise pour nos travaux de modélisation. La troisième particularité est la disponibilité de données du sol (sol minéral + litière) de la forêt, acquises à la fin de la campagne. Ces données sont nécessaires pour calibrer le paramètre de rugosité effectif h' du modèle de réflectivité du sol.

Les résultats des étapes de calibration du modèle de réflectivité du sol et de la formulation d'une température effective du milieu sol-couvert végétal (sous-bois) sont traités avant d'exposer les résultats finaux de simulations obtenus. Les données d'entrée des simulations sont fournies dans les tableau 1 de l'annexe.

Calibration du paramètre effectif de rugosité h' du modèle de réflectivité du sol

Les résultats de calibration du paramètre effectif de rugosité h' sont donnés dans le tableau 5.2. Ce tableau indique des erreurs similaires d'estimation de h' , mais c'est le modèle de Dobson *et al.* (1985) qui donne de faibles valeurs d'erreurs par rapport au modèle de Mironov *et al.* (2009). La valeur de h' qui a été adoptée dans les simulations des TB est 0,85. Elle a été obtenue avec le modèle de Dobson *et al.* (1985) et les données de TB des deux polarisations combinées acquises le 23 août sans sous-bois et sans litière. Des résultats similaires des performances de ces deux modèles ont été obtenus par Srivastava *et al.* (2015). La figure 5.11 illustre la variabilité de l'erreur en fonction de la valeur du paramètre effectif de rugosité h' .

Tableau 5.2. Résultat de l'optimisation (équation 4.1) du paramètre effectif de rugosité h' sur le site SF-MSA.

Données utilisées: Polarisation H et V		
	Mironov	Dobson
h'	0,91	0,85
RMSE (K)	1,29	1,17

Nous représentons sur la figure 5.12 les variations des constantes diélectriques du sol minéral en fonction de l'HS selon les deux modèles de constante diélectrique utilisés. Selon la texture du sol forestier du site SF-MSA, la figure 5.12 montre une différence entre les constantes diélectriques qui augmente avec l'augmentation de l'HS, alors que ces deux modèles faisaient des prédictions similaires pour les sites forestiers F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12.

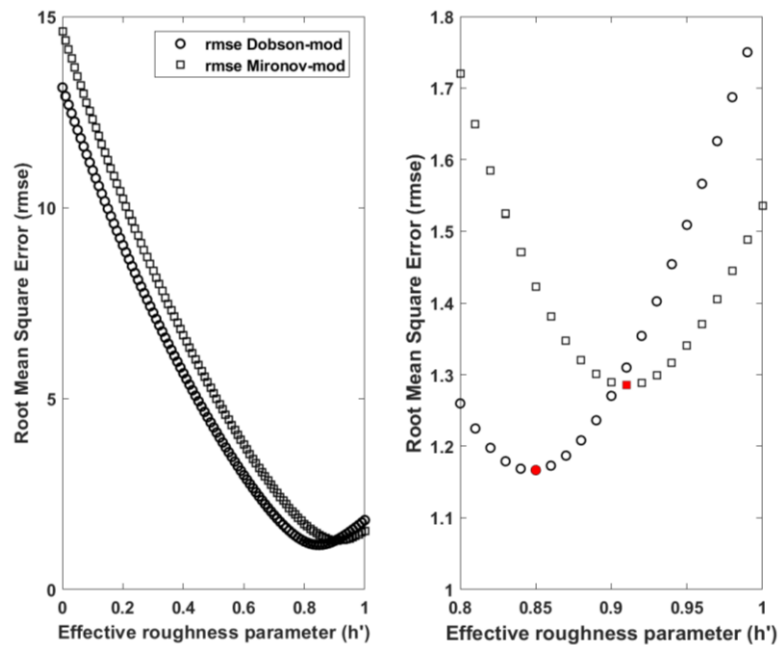


Figure 5.11. Figure de gauche : Variation de l'erreur d'optimisation en fonction du paramètre de rugosité effectif h' sur le site SF-MSA. Figure de droite : zoom de la figure de gauche montrant en rouge les erreurs optimales et les valeurs optimales de h'

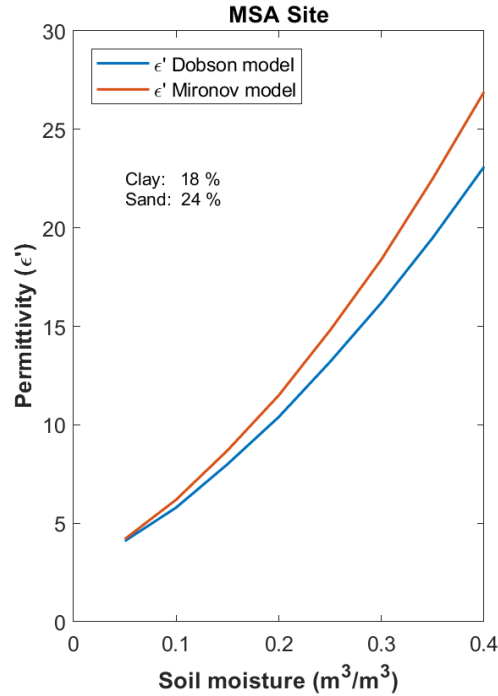


Figure 5.12. Comparaison des permittivités du sol minéral du site SF-MSA calculées avec le modèle de Dobson *et al.* (1985) et le modèle de Mironov *et al.* (2009)

Il faut remarquer ici que la texture du sol minéral du site SF-MSA est différente de celle des sites de la campagne SMAPVEX12. Ce type de texture faisait partie des textures des échantillons de sol considérées dans la dérivation du modèle de Dobson *et al.* (1985).

La figure 5.13 montre une comparaison entre les réflectivités selon les deux polarisations (H et V) du sol forestier trois-couches (présence de la couche de litière) et deux-couches (absence de la couche de litière), obtenues en utilisant le paramètre effectif de rugosité optimisé ($h' = 0,85$). Celle-ci montre que le modèle de constante diélectrique du sol minéral a un effet minime sur les réflectivités calculées pour le cas d'un sol forestier deux-couches (absence de litière) et pas d'effet sur les réflectivités d'un sol trois-couche (présence de litière), en dépit du constat de la figure 5.12. Les mêmes constats que ceux observés pour le cas des sites F2 et F3 (figure 5.5 et 5.6) de la campagne SMAPVEX12 sont observés dans le cas de la figure 5.12. La couche de litière a pour effet de réduire la réflectivité du sol forestier.

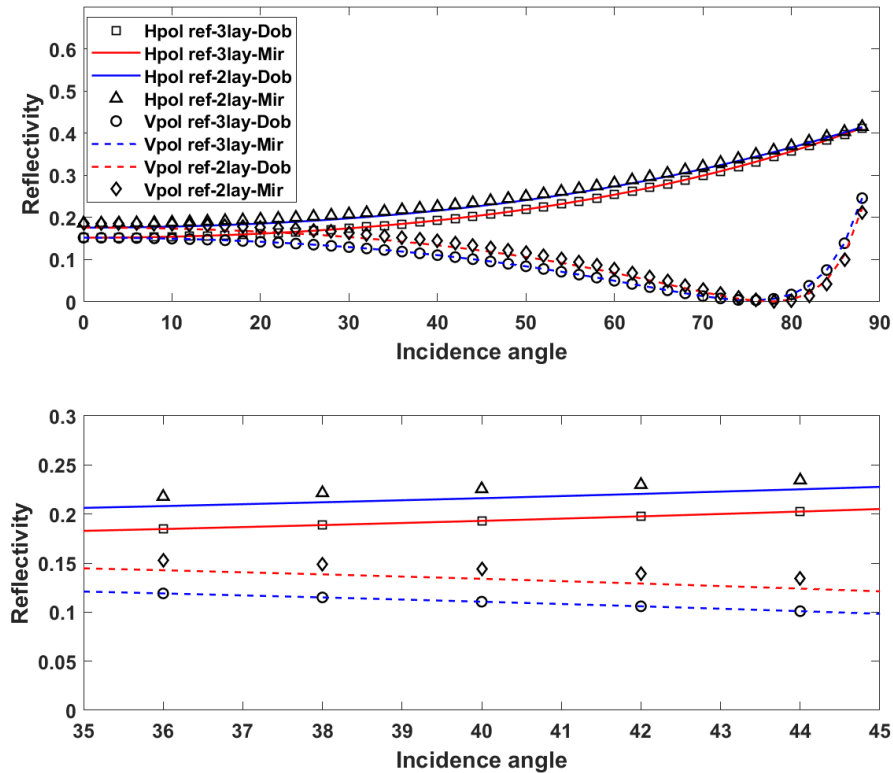


Figure 5.13. Panneau du haut : comparaison des réflectivités trois-couches (sol minéral, sol organique, air) et deux-couches (sol minéral, air) du sol du site SF-MSA. Panneau du bas: zoom du panneau du haut autour de l'angle d'incidence d'intérêt (40°).

Après la calibration du modèle de réflectivité du sol, nous passons à la problématique de définition d'une température effective du milieu forestier, particulièrement pour les jours de mesures du soir (voir figure 5.10).

Détermination de la température effective du milieu sol-couvert végétal (sous-bois)

Les options offertes pour la détermination de cette température effective du milieu sol-couvert végétal sont expliquées dans la section 4.1.3. La figure 5.14 montre les résultats de simulation obtenus quand la température effective du milieu observé est égale soit à la température du sol à 5 cm de profondeur, soit à la température de l'air, soit à la température composite moyenne sol-végétation (voir équation 2.6). La température effective de l'équation 2.6 est calculée avec les températures effectives du sol et de la végétation et la transmissivité de la couche de sous-bois.

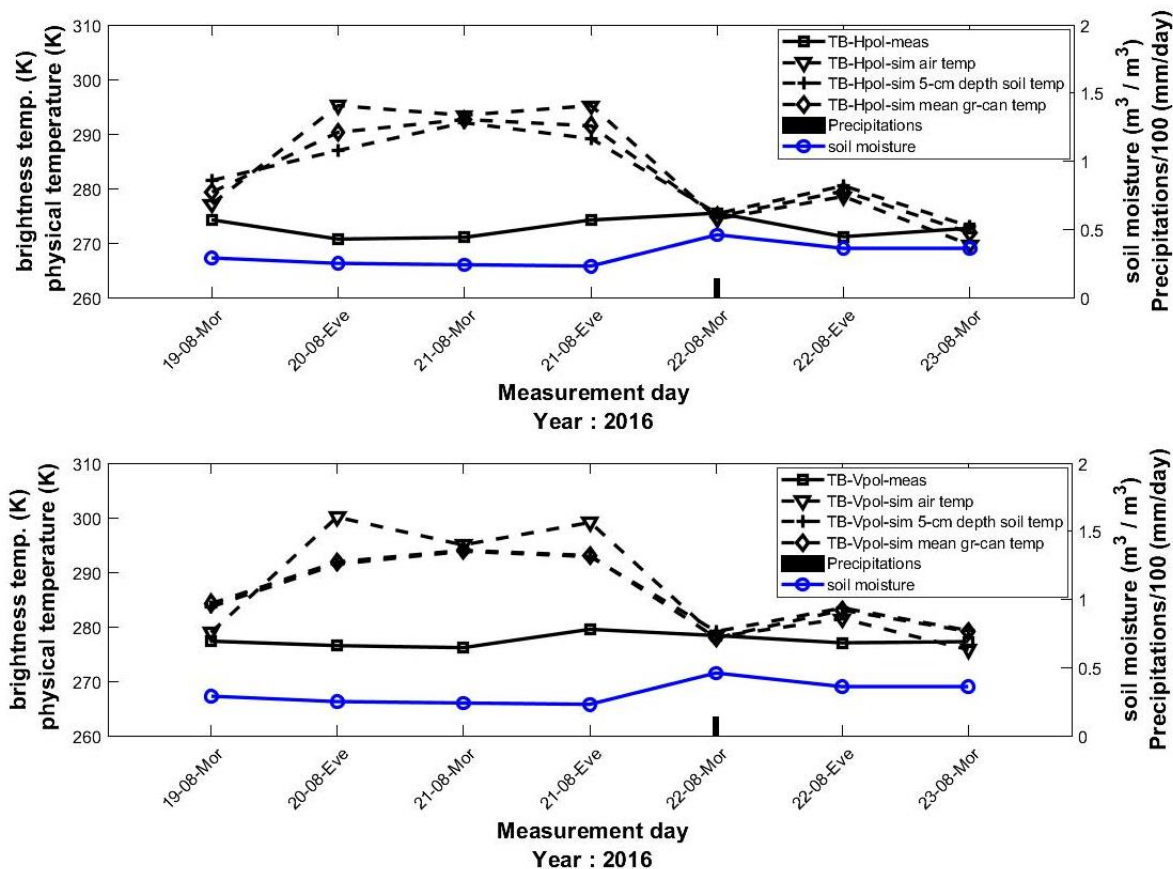


Figure 5.14. Comparaison des simulations de la solution K1 obtenues avec trois températures effectives (sol, air, composite air-sol) avec les observations du radiomètre selon la température effective utilisée sur le site SF-MSA.
Panneau haut : polarisation H, panneau bas : polarisation V

Selon l'équation 2.6, une température effective sol-végétation est calculée pour chaque polarisation (H, V). Par la suite, la moyenne de ces deux températures est considérée dans les simulations. Dans l'équation 2.6, la température de la végétation est prise égale à la température de l'air. La valeur du paramètre B_t est 1,7, tel que suggéré dans les travaux de de Wigneron *et al.* (2007).

La figure 5.14 montre que les simulations sont très sensibles à la température effective utilisée. Les erreurs de simulations sont plus importantes quand la température effective utilisée est la température de l'air. De plus, elles sont plus accentuées pour des mesures prises en soirée et peuvent atteindre 20 K. Ces périodes de mesures correspondent à un déséquilibre thermique plus important entre le sol minéral et le couvert végétal. La figure

5.14 montre aussi que la température effective obtenue avec l'équation 2.6 est très proche de la température du sol à 5 cm de profondeur. La valeur de B_t de 1,7 a été obtenue avec des données synthétiques simulées avec le modèle $\tau - \omega$ sur différents types de couverture à l'exception de terrains couverts de forêt (Wigneron *et al.*, 2007). De ce fait, nous avons proposé d'estimer la valeur de ce paramètre à travers un processus d'optimisation (équation 4.10). Le résultat de l'optimisation est donné sur la figure 5.15, avec les valeurs des erreurs optimales en polarisation H et en polarisation V.

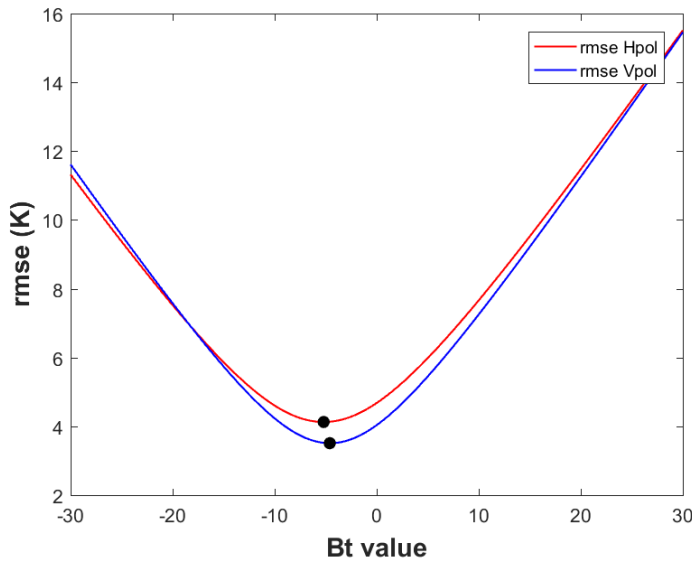


Figure 5.15. Erreurs d'optimisation en fonction de la valeur du paramètre B_t pour les polarisations H et V du site SF-MSA

Il est clair sur la figure 5.15 que les valeurs de B_t ayant permis d'avoir les erreurs optimales sont négatives. Cela implique une valeur négative de A_t (voir équation 2.6), alors que cette valeur est supposée varier entre 0 et 1 pour garder le sens physique de l'équation qui calcule la température effective du milieu sous-bois et sol forestier (sol minéral et litière). La valeur de A_t pondère la contribution de la température effective de la végétation et de la température effective du sol minéral.

Devant ce constat, nous avons proposé une troisième approche pour retrouver cette température effective du milieu observé. Nous avons proposé d'estimer cette valeur en optimisant la température effective elle-même en utilisant les TB acquises en polarisation V (équation 4.11). Pour l'évaluation des températures effectives obtenues, ces dernières

seront injectées dans l'équation 4.2 formulée en polarisation H.

Les erreurs de simulations des TB en polarisation H de la solution K1, correspondant à l'utilisation de cette température optimisée comme température effective, sont de 0,9 K. La figure 5.16 montre le profil temporel des TB simulées, en polarisation H, par rapport aux TB mesurées.

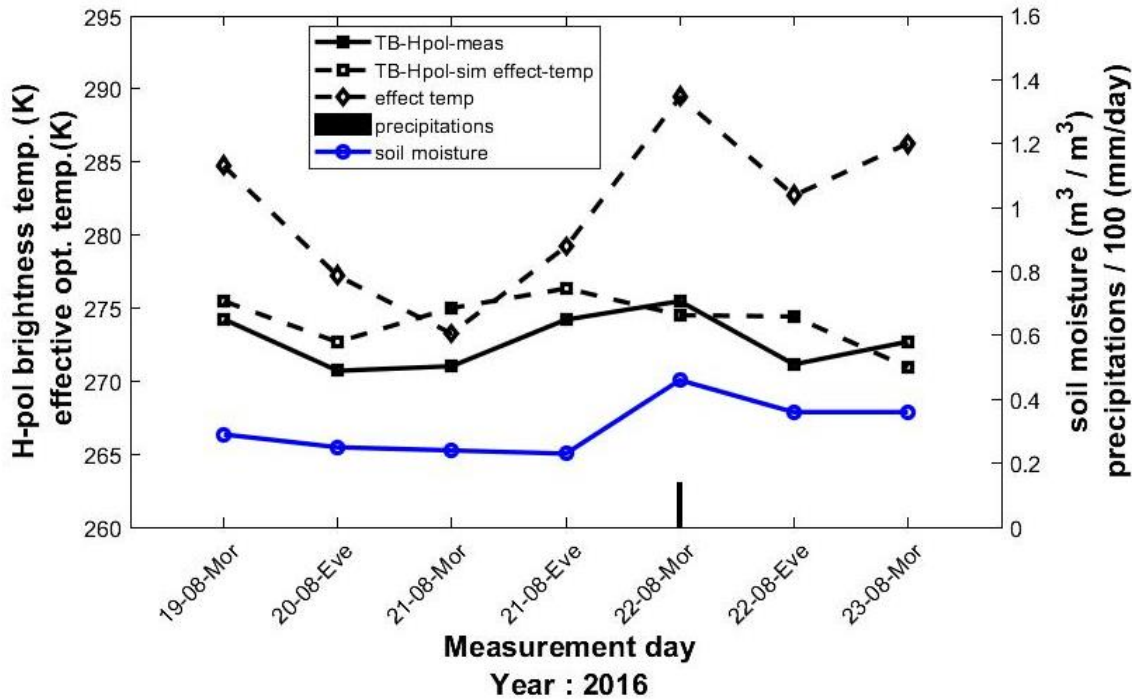


Figure 5.16. Comparaison des mesures du radiomètre avec les simulations en polarisation H de la solution K1 obtenues avec les températures effectives optimisées du site SF-MSA

Pour donner un sens physique à la température effective optimisée, nous avons étudié la corrélation de cette dernière avec les températures du sol (5 cm de profondeur) et de l'air. La figure 5.17 illustre les résultats obtenus. Les valeurs proches des corrélations de la figure 5.17 suggère que les deux températures influent sur la température effective. Seulement, avec si peu de points de mesure, des conclusions définitives ne peuvent pas être tirées. Nous avons mené une recherche bibliographique concernant la problématique de formalisation de la température effective de milieux couverts de végétation qui reste ouverte, particulièrement sur les milieux forestiers. Ceci nous a permis d'apporter des

éléments de réponse.

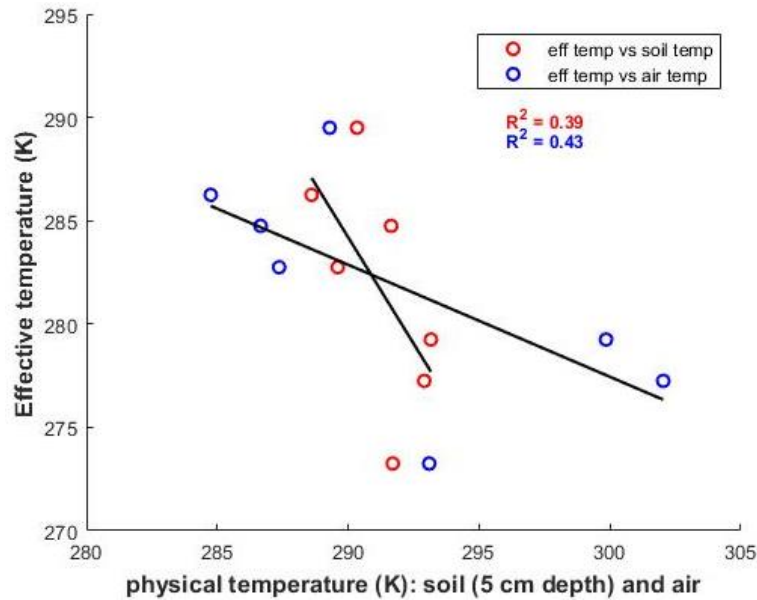


Figure 5.17. Corrélation entre les températures effectives estimées et les températures physiques du sol (5 cm de profondeur) et de l'air sur le site SF-MSA

En milieu forestier, la température de surface du sol est réduite par les couches du couvert végétal, le sous-bois, la litière et le sol organique. Ces couches jouent le rôle d'écran. En effet, les branches, les feuilles (feuillus), et les aiguilles (conifères) réfléchissent et absorbent le rayonnement solaire durant le jour, ne permettant pas ainsi à beaucoup d'énergie solaire d'atteindre le sol et l'air sous la canopée (Morecroft *et al.*, 1998; Renaud et Rebetez, 2009). Ceci est plus accentué pour des couverts forestiers très denses (Harwick *et al.*, 2015). Ceci laisse supposer que dans nos conditions d'observation, la température effective du milieu serait plus proche de la température des couches basses (sous-bois bas, litière, sol) que des couches hautes (sous-bois haut, branches, feuilles des arbres). Elle serait éventuellement plus proche de la température de l'air mesurée généralement à 1.5 m de hauteur.

En utilisant la température estimée par optimisation, à partir des mesures de TB en polarisation V, comme température effective, la figure 5.18 présente les profils temporels des TB observées et simulées par la solution K1 durant toute la campagne, y compris pour les étapes d'enlèvement de la couche de sous-bois, puis de la couche de litière. Durant

l'enlèvement de ces deux couches, l'humidité du sol, la température de sol et de l'air n'ont pas changé, sachant que les deux opérations avaient pris 5 minutes de temps.

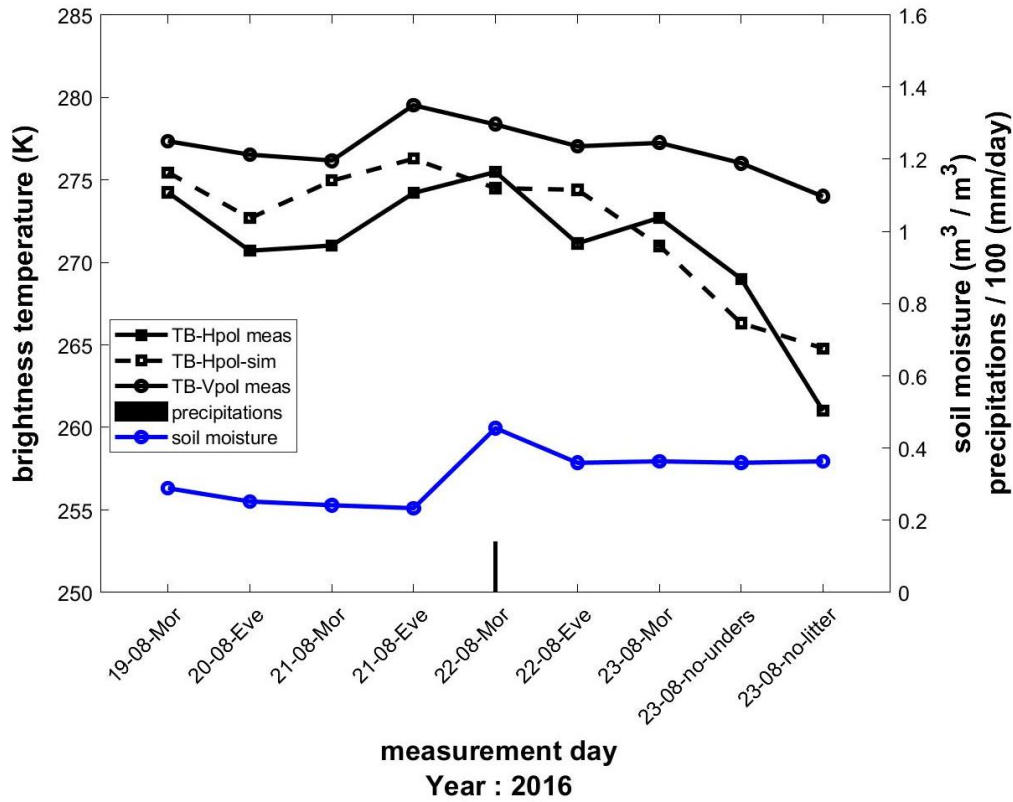


Figure 5.18. Comparaison des TB simulées et mesurées durant toute la campagne du site SF-MSA

Pour les deux dernières mesures de la campagne correspondant à l'enlèvement de la couche de sous-bois (23-08-no-unders) et de la couche de litière (23-08-no-litter), la figure 5.18 illustre que les simulations reproduisent le comportement des TB observées. L'impact de la couche de litière est nettement plus important que celui de la couche de sous-bois qui est très faible. Même avec une épaisseur fine (~ 1 cm), la couche de litière étant mouillée, après l'évènement de précipitation en fin de soirée du 21 août, son enlèvement a été suivi d'une diminution significative des TB, particulièrement en polarisation H. Plusieurs études (Grant *et al.*, 2007; Schwank *et al.*, 2008; Kurum *et al.*, 2012) ont mis en exergue cet aspect radiométrique de la couche de litière. Cette couche est une source d'émission quand elle est humide. Nos résultats montrent que même avec des épaisseurs faibles (~ 1 cm), cette couche reste une source d'émission.

5.1.3. Résultats de la campagne du site SF-SIRENE

La figure 5.19 illustre les données de TB recueillies durant toute la campagne, y compris lors de l'enlèvement de la couche de litière, ainsi que les données de températures du sol et de l'air et les données de précipitation et d'HS.

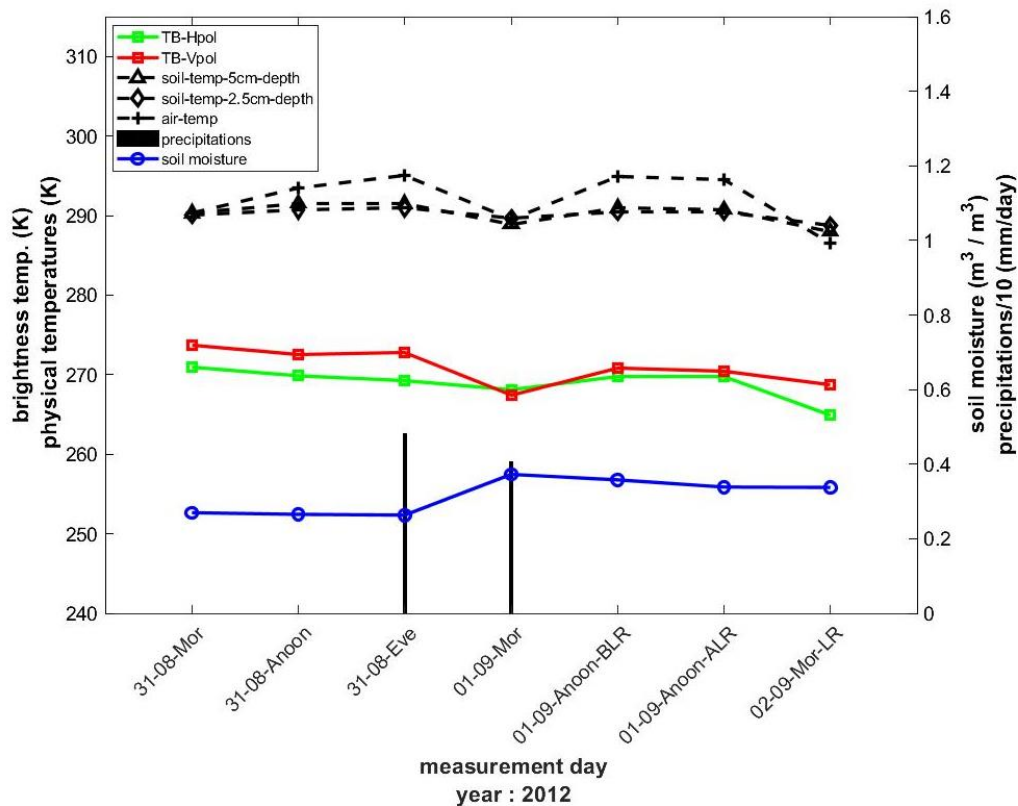


Figure 5.19. Profils temporels des TB et températures physiques mesurées du sol (2,5 et 5 cm de profondeur) et de de l'air sur le SF-SIRENE.

BLR : avant enlèvement de la couche de litière; ALR : après enlèvement de la couche de litière; LR : litière enlevée.

La figure 5.19 affiche un équilibre thermique entre les températures de l'air et les températures du sol aux deux profondeurs de mesures des sondes Decagon (2,5 et 5 cm) pour les mesures faites le matin. Pour les mesures de l'après-midi et du soir, un petit déséquilibre thermique est remarqué.

Durant l'opération de l'enlèvement de la couche de litière, les lectures de températures de l'air et du sol n'ont pas changé au même titre que les lectures de l'HS. De plus, les TB ont été insensibles à l'enlèvement de la couche de litière en dépit de ses conditions humides.

En effet, des évènements de précipitations ont eu lieu la nuit du 31 août et très tôt le matin du 1^{er} septembre. En conditions humides, la couche de litière est une source d'émission tel que démontré avec l'approche de mesure de la campagne du site SF-MSA. En revanche, sur ce site, l'effet de cette couche n'a pas été observé par le radiomètre, faisant des mesures au-dessus de la canopée, à cause de la forte atténuation du signal émanant du sol forestier par les couronnes des arbres. Ce site est particulièrement dense (voir tableau 3.1).

La figure 5.19 montre une diminution des mesures de TB le jour suivant l'enlèvement de la couche de litière (2 août), particulièrement en polarisation H. Ce constat serait lié à la diminution de la température du couvert végétal forestier (température de l'air) ou plutôt à une imprécision de mesure du radiomètre.

Comme pour le cas du site SF-MSA, après l'enlèvement de la couche de litière, des mesures radiométriques du sol forestier ont été acquises avec le même angle d'incidence (40°) que les observations faites au-dessus de la canopée forestière. Le but de ces mesures était la calibration du modèle de réflectivité du sol.

Calibration du paramètre de rugosité effectif h' du modèle de réflectivité du sol

Les résultats de cette étape sont donnés dans le tableau 5.3. La variation de l'erreur en fonction de la valeur h' est illustrée sur la figure 5.20. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus dans le cas du site SF-MSA. Pour cette campagne aussi, c'est le modèle de Dobson *et al.* (1985) qui donne la plus faible valeur d'erreur. Les travaux de simulation qui vont être présentés ont été obtenus en utilisant le modèle de Dobson *et al.* (1985) et avec $h' = 1.70$.

Sachant que la texture (sable 27 %, argile 14%) du sol forestier et l'épaisseur de la couche de litière sont presque similaires à celle du sol du SF-MSA, les courbes de réflectivités trois-couches (air-litière-sol minéral) et deux-couches (air-sol minéral) ne seront pas présentées dans cette section. Elles ne véhiculent pas une information supplémentaire par rapport aux figures présentées et commentées dans le cas de la campagne du site SF-MSA.

Tableau 5.3. Résultat de l'optimisation (équation 4.7) du paramètre effectif de rugosité h' sur le site SF-SIRENE

Données utilisées: Polarisation H et V		
	Mironov	Dobson
h'	1,79	1,70
rmse (K)	17.89	14,70

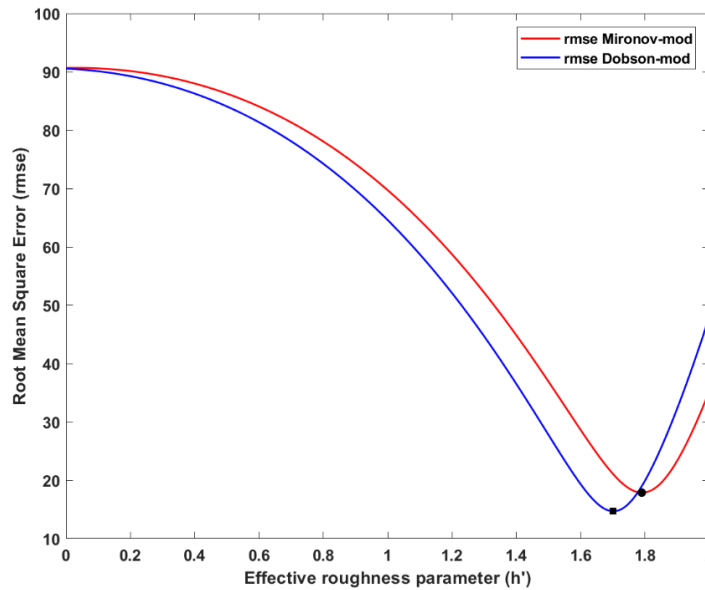


Figure 5.20. Variation de l'erreur d'optimisation en fonction du paramètre effectif de rugosité h' sur le site SF-SIRENE. Erreurs optimales et h' optimal sont indiqués avec un petit rectangle noir (rmse Dobson-mod) et un petit cercle noir (rmse Mironov-mod).

Dépendamment du choix de la température effective utilisée, c'est-à-dire la température du sol à 5 cm de profondeur, la température de l'air ou la température composite sol-couvert végétal (Gr-can temp), les résultats de simulations résultants sont illustrés sur la figure 5.21 pour la polarisation H et la figure 5.22 pour la polarisation V. Les données d'entrée des simulations sont fournies dans le tableau 2 de l'annexe. Plusieurs aspects importants sont à relever à propos des résultats des figures 5.21 et 5.22.

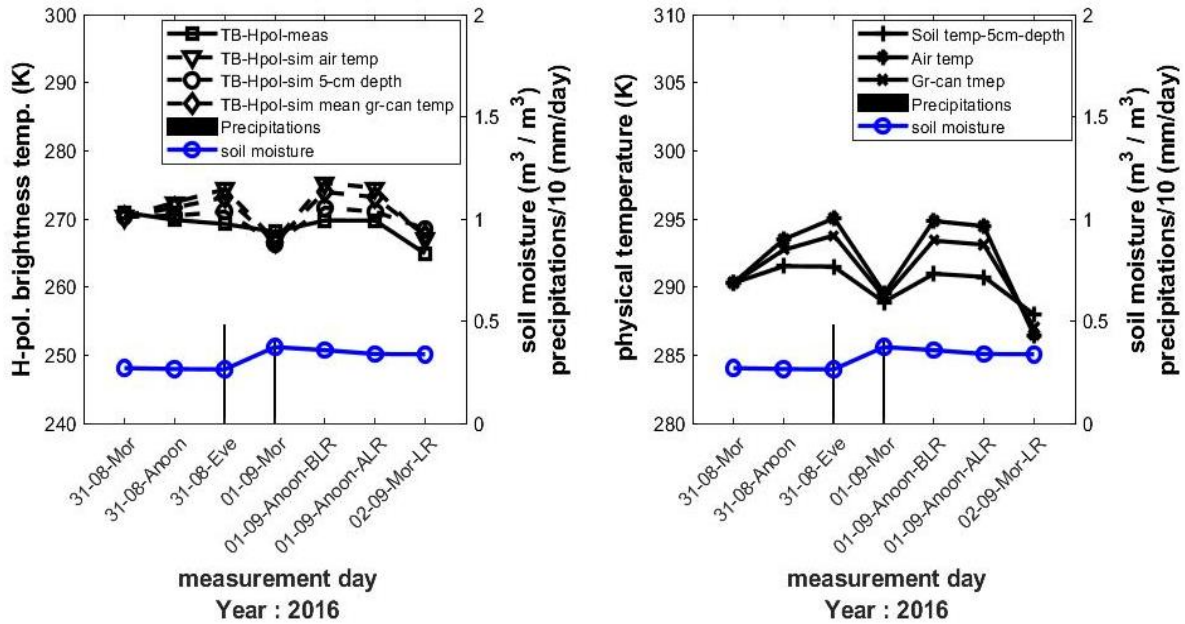


Figure 5.21. Figure de gauche: Comparaison des simulations de la solution K1 en polarisation H avec les mesures du radiomètre sur le site SF-SIRENE. Figure de droite : températures du sol à 5 cm de profondeur, température de l'air et la température composite sol-végétation utilisées comme températures effectives des simulations de TB de la figure de gauche

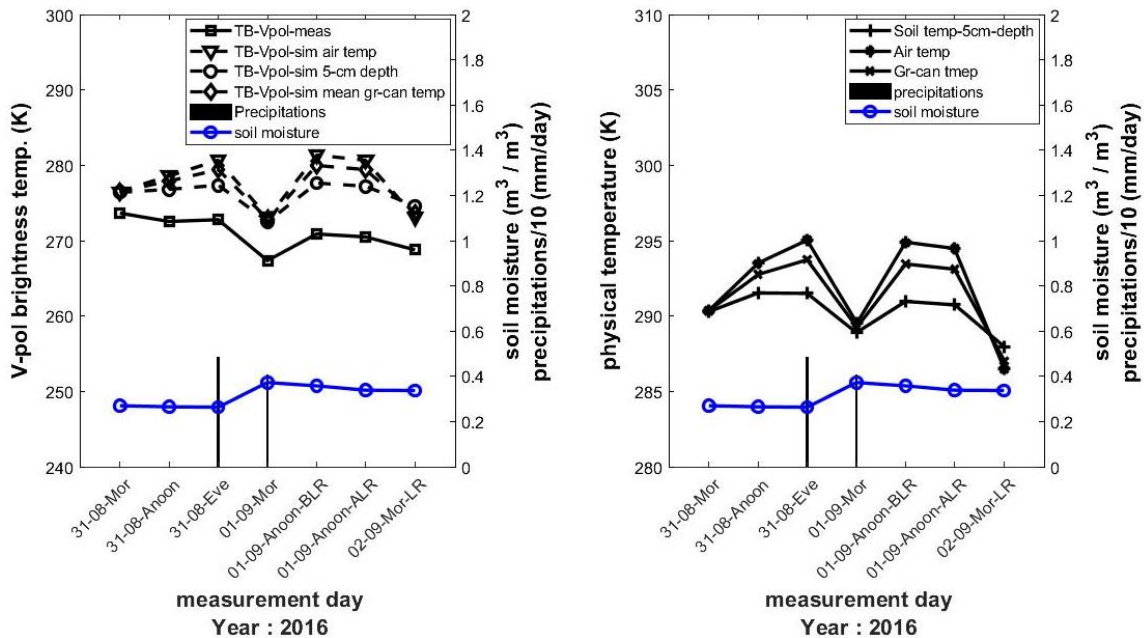


Figure 5.22. Figure de gauche: Comparaison des simulations de la solution K1 en polarisation V avec les mesures du radiomètre sur le SF-SIRENE. Figure de droite : températures du sol à 5 cm de profondeur, température de l'air et la température composite sol-végétation utilisées comme températures effectives des simulations de TB de la figure de gauche

Premièrement, sur un plan qualitatif, comparées aux simulations faites sur le site SF-MSA de la figure 5.14, les simulations des figures 5.21 et 5.22 n'affichent pas une sensibilité aussi importante aux températures utilisées comme températures effectives.

Sur un plan quantitatif, pour le cas le plus défavorable des simulations lorsque la température effective utilisée est celle de l'air, les erreurs de simulations sont nettement inférieures à celles obtenues sur le site SF-MSA. Pour le site SF-MSA (figure 5.14), des biais de plus de 20 K entre les simulations et les mesures radiométriques sont obtenus, particulièrement en polarisation H. De l'autre côté, pour le site SF-SIRENE et pour la même polarisation, des biais inférieurs à 10 K sont obtenus. En considérant les points précédents et les erreurs de simulations du tableau 5.4 associées aux figures 5.21 et 5.22, la problématique de la définition d'une température effective ne se pose pas pour le cas de cette campagne.

Tableau 5.4. Erreurs de simulation de la solution K1 du modèle de Kurum *et al.* (2011) en fonction des températures effectives utilisées sur le site SF-SIRENE

Température effective utilisée	rmse (K)		biais (K)	
	H-pol	V-pol	H-pol	V-pol
air	1,37	2,76	-2,61	-6,81
Sol (5 cm de profondeur)	0,72	2,00	-0,97	-5,14
Sol-couvert végétal	1,10	2,47	-2,01	-6,19

Deuxièmement, des erreurs de simulations satisfaisantes sont obtenues en utilisant les trois températures effectives. Ces erreurs sont du même ordre dans les deux polarisations, les plus avantageuses étant obtenues en utilisant la température du sol à 5 cm de profondeur comme température effective, particulièrement en polarisation H (tableau 5.4). Cette température sera retenue comme température effective pour la section 5.2.

Troisièmement, les simulations reproduisent le comportement observé relativement à l'enlèvement de la couche de litière, c'est-à-dire presque aucune variabilité du signal. Ce

résultat montre que le modèle cohérent de réflectivité trois-couches du sol permet de fournir des résultats de simulations très satisfaisants. Les erreurs de simulations en polarisation V sont supérieures à celles observées en polarisation H.

Le dernier point concerne la prise en compte de la couche de sous-bois dans les simulations et son effet sur l'émissivité et la transmissivité globale de la canopée (arbres + sous-bois). Les simulations réalisées ont montré que la couche de sous-bois n'a aucun impact sur ces deux derniers paramètres. La densité, les dimensions des éléments de la couche de sous-bois, ainsi que l'orientation statistique, relativement à la bande L ont un effet très faible sur le processus d'extinction du signal radiométrique.

5.2. Comparaison des performances du modèle d'ordre 1 de Kurum *et al.* (2011) et du modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0 et comparaison des propriétés radiatives (τ et ω) des couverts forestiers découlant de ces deux modèles

À titre de rappel, tel qu'expliqué dans la section 4.3, pour chaque campagne, toutes les simulations du modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0 sont obtenues en injectant dans ce dernier les valeurs d'épaisseur optique τ calculées théoriquement par le modèle de Kurum *et al.* (2011) et la valeur d'albédo effectif ω^* (0,05) utilisée dans le cadre de la mission SMAP pour les couverts forestiers et les arbustes. Concernant la partie de la comparaison des paramètres radiatif découlant du modèle $\tau - \omega$ et du modèle de Kurum *et al.* (2011), dans le processus d'optimisation des paramètres τ et ω^* du modèle $\tau - \omega$, les modèles de constante diélectrique du sol minéral de Dobson *et al.* (1985) et de Mironov *et al.* (2009) ont été testés pour évaluer leur impact sur les valeurs des paramètres optimisés.

5.2.1. Résultats de la campagne SMAPVEX12

Pour le cas des sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12, le calcul théorique de l'albédo de simple diffusion ω (équations 2.3 et 2.9) et de l'épaisseur optique τ (équations 2.4 et 2.11) montre que ces deux paramètres dépendent de la polarisation. Ces calculs sont résumés dans le tableau 5.5. La figure 5.23 illustre les profils temporels d'albédo effectif calculés théoriquement (équation 2.13) par le modèle de Kurum *et al.* (2011). Concernant les paramètres τ et ω^* du modèle $\tau - \omega$, nous proposons, sachant les résultats du tableau

5.5 et de la figure 5.23, de les optimiser en polarisation H et en polarisation V.

Les valeurs optimisées de ces deux paramètres pour les deux sites F2 et F3 sont résumées dans le tableau 5.6. L'utilisation du modèle de Dobson *et al.* (1985) ou de Mironov *et al.* (2009) n'a pas d'influence sur les valeurs des paramètres τ et ω^* optimisés et ce pour les deux sites F2 et F3. Les figures 5.24 (site F3) et 5.25 (site F2) illustrent l'erreur d'optimisation en fonction des valeurs des paramètres τ et ω^* .

Tableau 5.5. Paramètres radiatifs τ et ω du couvert végétal forestier (arbres et sous-bois) calculés théoriquement par le modèle de Kurum *et al.* (2011) sur les sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12

	τ		ω	
	H-pol	V-pol	H-pol	V-pol
Site F2	0,411	0,478	0,499	0,569
Site F3	0,447	0,663	0,487	0,589

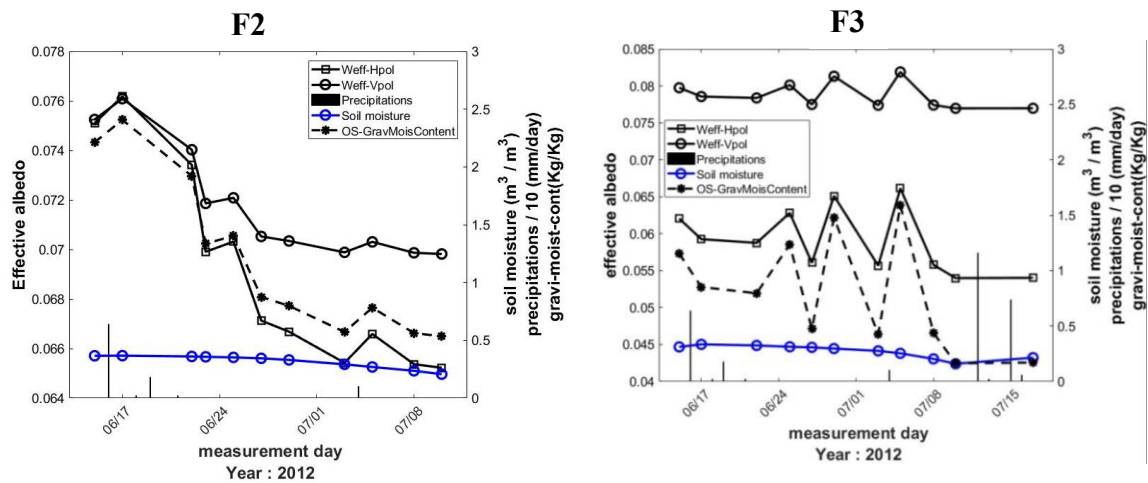


Figure 5.23. Profils temporels d'albédo effectif, calculé théoriquement (équation 2.13) en polarisation H et en polarisation V sur le site F2 (à gauche) et le site F3 (à droite), de l'humidité du sol, et du contenu en eau gravimétrique de la couche de sol organique

Des valeurs de ω^* proches de celles estimées pour les sites F2 et F3 (tableau 5.6) ont été

estimées à partir des observations en bande L (Grant et al., 2008; Santi et al., 2009). Il en est de même pour τ optimisée en polarisation H pour le cas du site F2. Pour les deux polarisations, l'allure de ω^* de la figure 5.23 suit l'allure du contenu en eau de l'humus.

Tableau 5.6. Paramètres τ et ω^* issus du processus d'optimisation du modèle $\tau - \omega$ avec les données acquises sur les sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12

	τ		ω^*	
	H-pol	V-pol	H-pol	V-pol
Site F2	0,950	0,340	0,115	0,145
Site F3	0,420	0,350	0,200	0,175

Les simulations faites par Kurum *et al.* (2012a) ont montré l'apport de cette couche sur la diffusion d'ordre 1 et par conséquent sur ω^* (équation 2.13). Pour le site F2, la plage de variation de ω^* est faible (1 % en H et 0.5 % en V). En polarisation V, ω^* varie entre 0,070 et 0,076. En polarisation H, il varie entre 0,064 et 0,076.

Aussi, sur le site F2, l'écart entre ω^* en polarisation H et celui en polarisation V augmente avec la tendance en baisse des contenus en eau des couches du sol forestier. Pour le site F3, ω^* varie autour de 0,06 en polarisation H et autour de 0,08 en polarisation V (voir figure 5.23). La variation en dents de scie du contenu en eau gravimétrique du site F3 serait probablement due à des erreurs de mesure, car ce comportement n'a pas été observé sur le site F2 qui montre une diminution graduelle du contenu en eau gravimétrique de la couche organique et de l'HS minéral.

Les valeurs de ω^* calculées théoriquement pour les deux sites F2 et F3 et pour les deux polarisations (figure 5.23) sont nettement inférieures aux valeurs trouvées lors du processus d'optimisation des paramètres τ et ω^* du modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0 (tableau 5.6). Dans l'équation théorique (2.13) de l'albédo effectif du modèle de Kurum *et al.* (2011), les diffusions multiples sont prises en considération par le terme Ω_p de diffusion d'ordre 1.

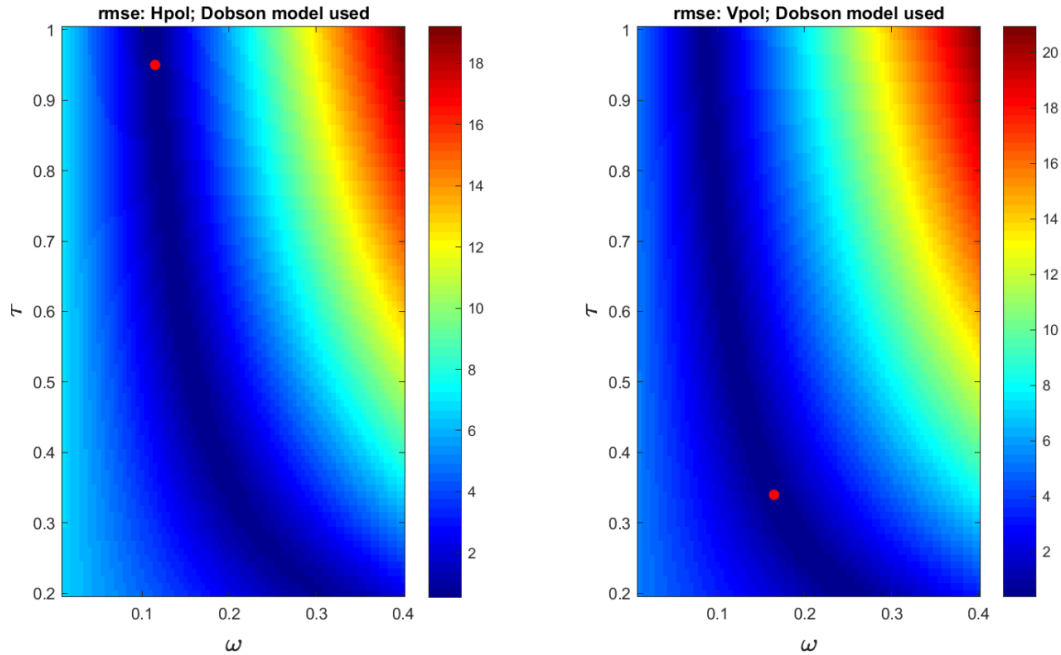


Figure 5.24. Erreur quadratique moyenne (K) en fonction des paramètres τ et ω . Valeurs optimales des paramètres τ et ω^* correspondant à l'erreur optimale sont identifiées par les coordonnées du point rouge. Site F2.

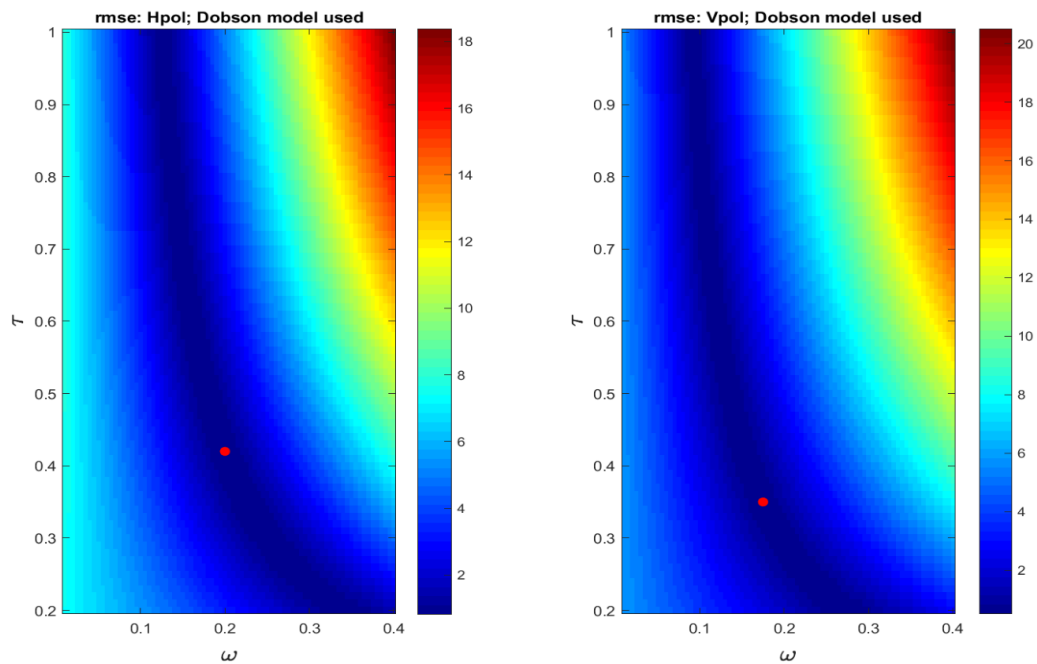


Figure 5.25. Erreur quadratique moyenne (K) en fonction des paramètres τ et ω . Valeurs optimales des paramètres τ et ω^* correspondant à l'erreur optimale sont identifiées par les coordonnées du point rouge. Site F3.

Dans la même équation, d'autres termes liés au sol et au couvert végétal sont aussi pris en considération. Cet albédo effectif tient compte de tous les processus se produisant dans le milieu forestier. Quant au modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0, les valeurs de τ et ω^* optimisées sont dépendantes uniquement des mesures de TB. Si un autre jeu de données d'optimisation est utilisé, les valeurs de τ et ω optimisées peuvent être différentes. Cela constitue une faiblesse des modèles semi-empiriques tel que le modèle $\tau - \omega$ (Wigneron *et al.*, 2017). Les valeurs d'albédo effectif de la figure 5.23 sont relativement proches de la valeur de 0,05 qui est utilisée par la mission SMAP pour ce type de forêt et indépendamment de la polarisation (Chan *et al.*, 2016).

Les simulations de la solution K1 et K0 du modèle de Kurum *et al.* (2011) et celles du modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0 sont illustrées sur la figure 5.26 pour le site F2 et la figure 5.27 pour le site F3. Les erreurs de simulations correspondantes sont données dans le tableau 5.7. Les simulations des figures 5.26 et 5.27 montrent clairement la différence entre l'albédo de simple diffusion ω de la solution K0, qui est une solution physique d'ordre 0 de diffusion, et l'albédo effectif ω^* du modèle semi-empirique $\tau - \omega$ d'ordre 0 de diffusion. Les TB très basses simulées par la solution K0 par rapport aux TB simulées par le modèle $\tau - \omega$ s'expliquent par les valeurs importantes de ω du tableau 5.5 (voir équation 2.7). Ce résultat montre clairement que la solution d'ordre 0 est insuffisante pour faire des simulations sur des couverts forestiers.

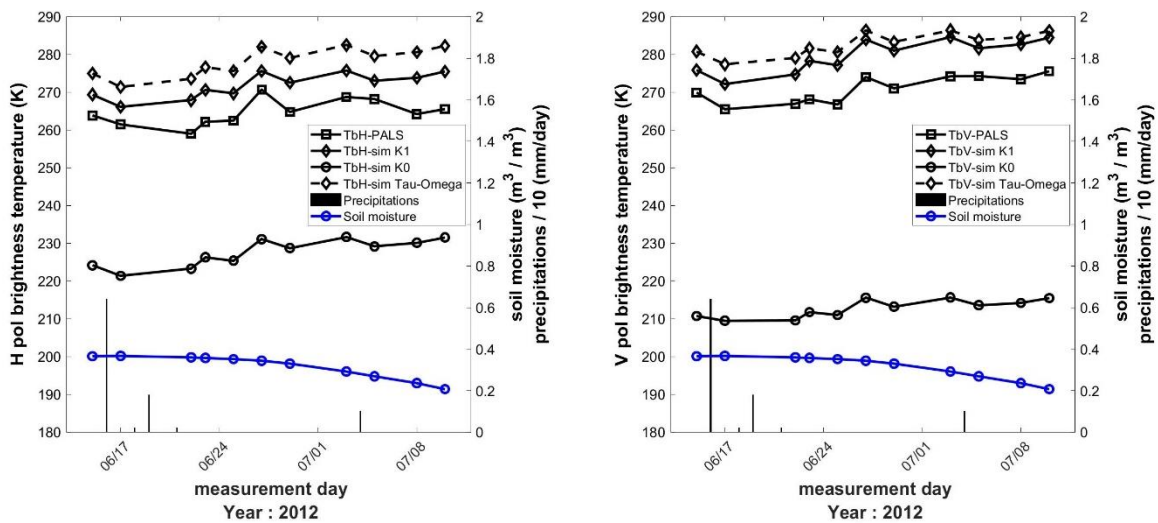


Figure 5.26. Comparaison des solutions K0 et K1 du modèle de Kurum *et al.* (2011) avec les simulations du modèle $\tau - \omega$ sur le site F2

Le tableau 5.7 montre que les erreurs de simulation de la solution K1 sont meilleures par rapport à celles du modèle $\tau - \omega$. Les figures 5.26 et 5.27 montrent que les simulations du modèle $\tau - \omega$ surestiment les simulations théoriques de la solution K1, et encore plus les mesures de TB.

Tableau 5.7. Comparaison des erreurs de simulations des solutions K0 et K1 du modèle de Kurum *et al.* (2011) avec les simulations du modèle $\tau - \omega$ sur les sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12

	Hpol-Biais (K)	Vpol-Biais (K)	Hpol-rmse (K)	Vpol-rmse (K)
Site F2				
Solution K1	7,17	8,80	2,23	2,69
Solution K0	-43,35	-51,88	13,08	15,65
Modèle $\tau - \omega$ $\tau_{K1}, \omega^*_{smap}$	13,11	11,44	4,00	3,47
Site F3				
Solution K1	14,69	11,17	4,51	3,46
Solution K0	-36,61	-78,90	11,10	23,79
Modèle $\tau - \omega$ $\tau_{K1}, \omega^*_{smap}$	19,71	11,42	6,00	3,48

La surestimation est particulièrement importante en polarisation H. Ce constat montre que la valeur de 0,05 de ω^* , utilisée par la mission SMAP, injecté au modèle $\tau - \omega$ est faible.

Les résultats obtenus sur ces deux sites indiquent que les valeurs de τ et ω , calculées théoriquement dépendent de la polarisation et varient d'un couvert forestier à un autre selon la densité du couvert forestier, les dimensions des éléments le constituant, et leur contenu en eau. Les résultats non satisfaisants d'estimation de l'HS de la mission SMAP sur les régions à couverture forestière sont dus au mauvais paramétrage de τ et ω^* (Chan *et al.*, 2016). Selon la même étude, des effets saisonniers de ces paramètres doivent être pris en

compte. Les valeurs prises par défaut dans les algorithmes d'estimation de l'HS des missions SMOS et SMAP sont indépendantes de la polarisation et sont fixes pour une gamme large de couverts forestiers. Ces hypothèses doivent être corrigées dans le but d'améliorer l'estimation de l'HS des couverts forestiers dont les caractéristiques le permettent (densité du couvert végétal, contenu en eau, présence de couche de litière et de sous-bois).

5.2.2. Résultats de la campagne du collège Mont-Ste-Anne

Avant d'exposer les résultats de l'optimisation des paramètres τ et ω^* du modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0, un calcul théorique de l'épaisseur optique τ (équations 2.4 et 2.11) et de l'albédo de simple diffusion ω (équations 2.3 et 2.9) est fait avec le modèle de Kurum *et al.* (2011) dans le but de nous guider dans le processus d'optimisation par rapport à la dépendance ou pas de τ et ω^* à la polarisation. Les valeurs théoriques de τ et ω sont données dans le tableau 5.8.

Le profil temporel de l'albédo effectif (équation 2.13) est illustré sur la figure 5.28. Les valeurs d'albédo effectif de la figure 5.28 sont faibles et attendues du fait que le sous-bois est majoritairement constitué de feuilles. Dans ce type de couvert, les diffusions multiples sont faibles en bande L (Kurum *et al.*, 2013). Elles sont proches des valeurs effectives obtenues par Kurum *et al.* (2013), particulièrement en polarisation V, sur un couvert végétal de soja en utilisant le même modèle. Des valeurs d'albédo effectif inférieures à 0,02 ont été obtenues (Kurum *et al.*, 2013).

Tableau 5.8. Calcul théorique des paramètres radiatifs τ et ω du couvert végétal (sous-bois) du site SF-MSA

	τ		ω	
	H - pol	V - pol	H - pol	V - pol
SF-MSA	0,229	0,224	0,071	0,065

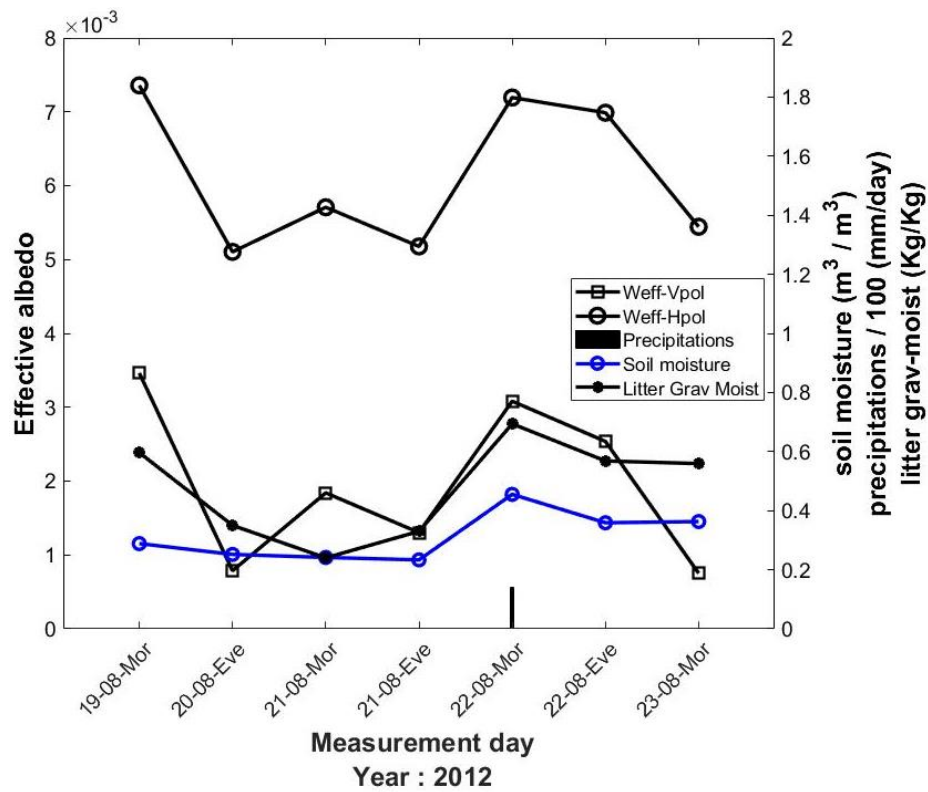


Figure 5.27. Profil temporel de l'albédo effectif, calculé théoriquement (équation 2.13), en polarisation H et en polarisation V sur le site SF-MSA

En considérant les résultats présentés dans le tableau 5.8 et la figure 5.28, un processus d'optimisation a été mené (équation 4.9) pour estimer τ et ω^* du modèle $\tau - \omega$. La température effective utilisée dans ce processus d'optimisation est la température effective optimisée (voir section 5.1.2). Néanmoins, ce processus d'optimisation n'a pas convergé vers un minimum local unique tel que retrouvé dans le cas des sites forestiers de la campagne SMAPVEX12, mais plusieurs minimums locaux (voir figure 5.29).

La plage d'optimisation de ω^* a été fixée à $[10^{-4} \ 10^{-1}]$ avec un pas d'optimisation de 10^{-5} . Pour ce qui est de τ , elle a été fixée à $[0.2 \ 1]$ avec un pas d'optimisation de 10^{-3} . Ces plages de de variation de τ et ω^* ont été définies de sorte qu'elles englobent les valeurs utilisées dans la littérature pour caractériser les couvert végétaux. L'erreur d'optimisation correspondant à ces plages d'optimisation est illustrée sur la figure 5.29. L'erreur d'optimisation est insensible au modèle de constante diélectrique du sol minéral.

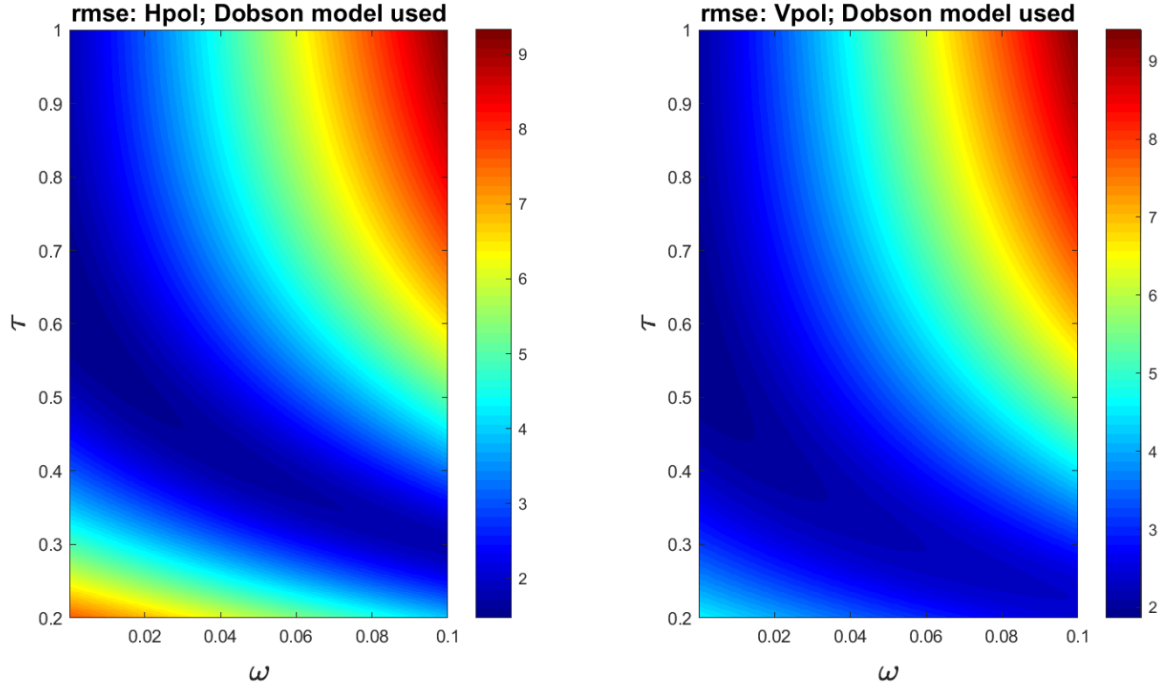


Figure 5.28. Variabilité de l’erreur d’optimisation en fonction des valeurs des paramètres τ et ω^* sur le site SF-MSA

Nous pensons que les explications énoncées lors de l’évaluation de la solution K1 du modèle de Kurum *et al.* (2011) pour étayer les sensibilités élevées des simulations par rapport aux données de températures physiques utilisées sont valables pour expliquer les résultats d’optimisation de la figure 5.29. Nous référons à l’étude de Grant *et al.* (2009) où dans les mêmes conditions d’observation, des émissivités supérieures à l’unité (1) du sol ont été simulées, ce qui est physiquement incorrect. Dans les conditions d’observation de ce site, il est très difficile de quantifier et de modéliser toutes les contributions mesurées par le radiomètre.

Les simulations en polarisation H du modèle $\tau - \omega$ et des solutions K0 et K1 du modèle de Kurum *et al.* (2011) sont illustrées sur la figure 5.30. Les erreurs de simulations de ces trois modèles sont données dans le tableau 5.9. Seuls les résultats obtenus en polarisation H sont exposés vu que les températures effectives optimisées ont été obtenues avec les mesures de TB acquises en polarisation V.

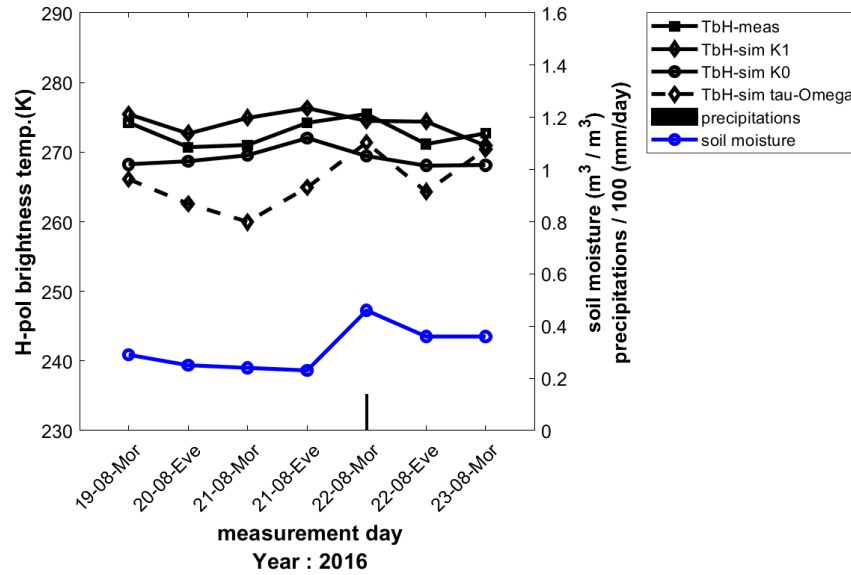


Figure 5.29. Comparaison des solutions K0 et K1 du modèle de Kurum *et al.* (2011) avec les simulations du modèle $\tau - \omega$ sur le site SF-MSA

Tableau 5.9. Comparaison des erreurs de simulations des TB en polarisation H des solutions K0 et K1 du modèle de Kurum *et al* (2011) avec les simulations du modèle $\tau - \omega$ sur le site SF-MSA

Site SF-MSA		
	Hpol-biais (K)	Hpol-rmse (K)
Solution K1	1,40	0,90
Solution K0	-4,30	1,70
Modèle $\tau - \omega$ $\tau_{K1}, \omega^*_{smap}$	-7,12	2,89

La solution K1 fournit les erreurs optimales de simulations, suivies par celles de la solution K0 puis celles du modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0. La figure 5.30 montre que l'approximation d'ordre 0 pour ce type de couvert végétal est valable. Ceci est expliqué par le fait que la diffusion multiple n'est pas importante, tel que montré par le calcul théorique de ω^* de la

figure 5.28. De plus, la figure 5.30 montre que la valeur de ω^* appliquée au modèle $\tau - \omega$ pour ce type de couvert végétal est élevée, car cette solution sous-estime les mesures du radiomètre.

5.2.3. Résultats de la campagne du site SF-SIRENE

Avec les données recueillies du couvert forestier, les calculs théoriques de l'albédo de simple diffusion ω (équations 2.3 et 2.9) et de l'épaisseur optique τ (équations 2.4 et 2.11) sont donnés dans le tableau 5.10. Le profil temporel de l'albédo effectif ω^* calculé théoriquement (équation 2.13) par le modèle de Kurum *et al.* (2011) est illustré sur la figure 5.31. Le tableau 5.10 et la figure 5.31 suggèrent d'optimiser les valeurs de τ et ω^* pour chaque polarisation.

Tableau 5.10. Calcul théorique (équations 2.9 et 2.11) des paramètres radiatifs τ et ω du couvert végétal forestier (arbres et sous-bois) du site SF-SIRENE

	τ		ω	
	H - pol	V - pol	H - pol	V - pol
SF-SIRENE	0,31	0,42	0,46	0,51

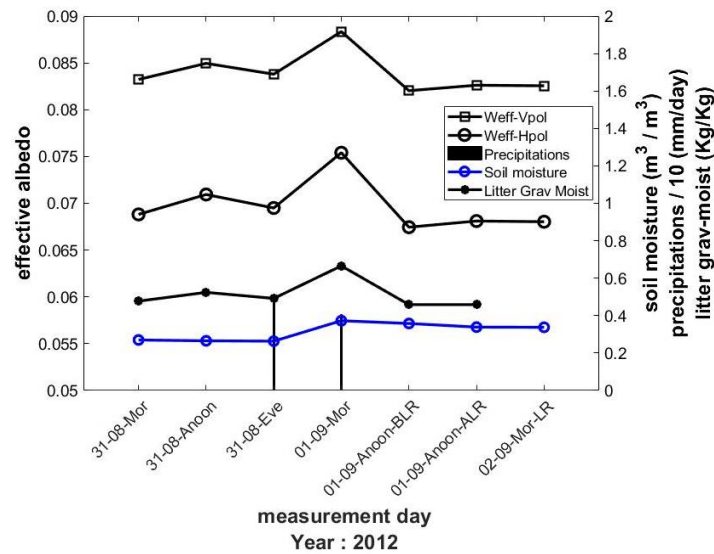


Figure 5.30. Profil temporel de l'albédo effectif, calculé théoriquement (équation 2.13) par le modèle de Kurum *et al.* (2011), en polarisation H et en polarisation V sur le site SF-SIRENE

Les résultats de l'optimisation des paramètres radiatifs τ et ω^* sont donnés dans le tableau 5.11. Les erreurs d'optimisation des deux paramètres sont illustrées sur la figure 5.32.

Tableau 5.11. Paramètres radiatifs effectifs τ et ω^* issus du processus d'optimisation du modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0 sur le site SF-SIRENE

	τ		ω^*	
	H - pol	V - pol	H - pol	V - pol
SF-SIRENE	0,900	0,900	0,090	0,085

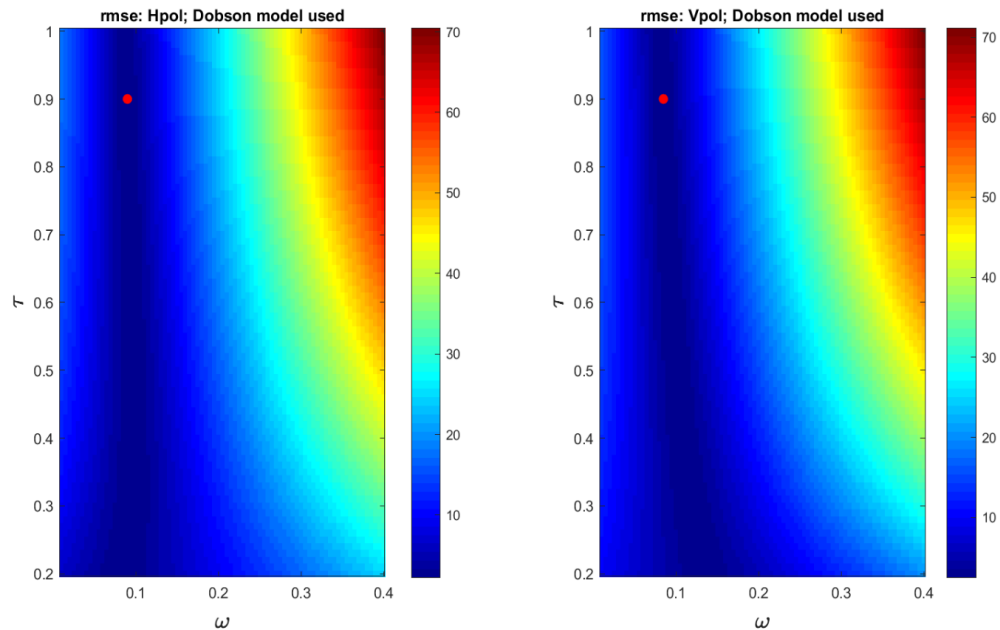


Figure 5.31. Erreur quadratique moyenne (K) en fonction des paramètres τ et ω en polarisation H (à gauche) et en polarisation V (à droite) sur le site SF-SIRENE. Les valeurs optimales des paramètres τ et ω^* correspondant à l'erreur optimale sont identifiées par les coordonnées du point rouge.

Les simulations des solutions K1 et K0 du modèle de Kurum *et al.* (2011) et celles du modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0 sont illustrées sur la figure 5.33. Les erreurs statistiques correspondantes sont données dans le tableau 5.12.

En comparant les tableaux 5.10, 5.11 et la figure 5.31, il apparait que les valeurs d'épaisseur optique estimées par optimisation surestiment celles obtenues théoriquement par la solution K1. Les valeurs d'épaisseur optique calculées théoriquement correspondent aux

valeurs de transmissivité publiées dans la littérature, qui sont dans l'intervalle $[0,4 \ 0,7]$, ce qui n'est pas le cas des valeurs de transmissivité qui sont estimées par optimisation. Celle-là restent liées aux données acquises de TB du couvert végétal et du sol forestier et non aux propriétés physiques et géométriques des éléments constituant ce couvert forestier. De la figure 5.31, les valeurs d'albédo effectif calculées théoriquement par la solution K1 en polarisation V et en polarisation H sont respectivement dans les plages $[0,08 \ 0,09]$ et $[0,065 \ 0,075]$.

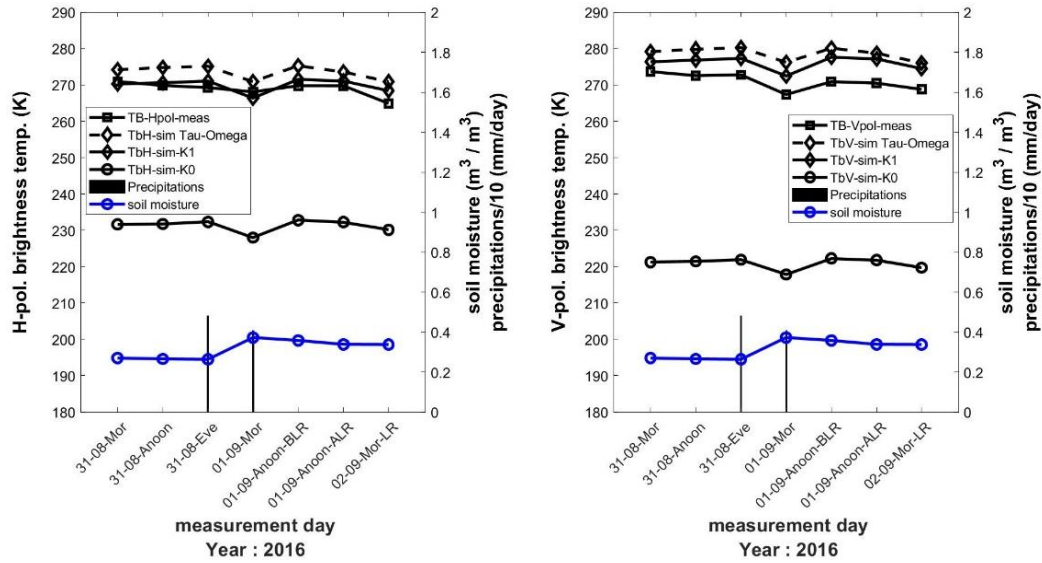


Figure 5.32. Comparaison des solutions K0 et K1 du modèle de Kurum *et al.* (2011) avec les simulations du modèle $\tau - \omega$ sur le site SF-SIRENE

En faisant une comparaison avec les valeurs de ω^* estimées par optimisation du modèle $\tau - \omega$ (tableau 5.11), la valeur estimée en polarisation H surestime celles calculées théoriquement. En revanche, en polarisation V, la valeur de ω^* estimée et celles calculées théoriquement sont du même ordre.

La différence entre l'albédo de simple diffusion ω et l'albédo effectif ω^* est mise en exergue dans la figure 5.33. L'albédo de simple diffusion fait en sorte que les simulations de la solution K0 sous-estiment largement les mesures de TB. La raison est la valeur élevée de ce paramètre qui atténue de beaucoup les simulations de la solution K0 tel que démontré dans l'équation 2.7. Cela démontre bien que l'albédo utilisé dans le modèle $\tau - \omega$ d'ordre

0 n'est plus un albédo de simple diffusion, mais correspond bien à un albédo effectif.

Aussi, pour le cas de cette campagne, les erreurs de simulations du tableau 5.12 montrent que les performances de la solution K1 surestiment les mesures du radiomètre, mais elles sont meilleures que celles du modèle $\tau - \omega$. Les résultats de la figure 5.33 montrent que les simulations du modèle $\tau - \omega$ surestiment les simulations théoriques de la solution K1 de façon quasiment identique pour les deux polarisations. Cela montre bien que la valeur de ω^* utilisée pour les simulations du modèle $\tau - \omega$ est très faible.

Tableau 5.12. Évaluation statistique des simulations des solutions K0 et K1 du modèle de Kurum *et al.* (2011) avec le modèle $\tau - \omega$ après l'optimisation de τ et ω sur le site SF-SIRENE.

	Hpol-Biais	Vpol-Biais	Hpol-rmse	Vpol-rmse
Site SF-SIRENE				
Solution K1	0,97	5,13	0,72	2,00
Solution K0	-37,69	-50,05	14,26	18,92
Modèle $\tau - \omega$ $\tau_{K1}, \omega^*_{smap}$	4,60	7,70	1,79	2,94

6. Conclusion

Les travaux de recherche entrepris ont permis de répondre à l'objectif principal de la thèse, à savoir la compréhension de l'interaction des températures de brillance en bande L avec les couches de milieux forestiers dans la perspective d'améliorer l'estimation de l'humidité du sol. Pour répondre à cet objectif, une hypothèse a été avancée. La compréhension de l'interaction des températures de brillance en bande L avec les couches de milieux forestiers est conditionnée par la caractérisation du comportement radiatif des différentes couches le constituant: couronnes des arbres, sous-bois et couches organiques recouvrant le sol minéral. Ceci a été possible grâce à l'utilisation du modèle physique d'ordre 1 de diffusion de Kurum *et al.* (2011), basé sur la théorie du transfert radiatif, combiné à un jeu de données complémentaires et pertinentes de terrain. En effet, les données exploitées viennent de trois campagnes de mesures terrain. Le premier jeu de données est acquis durant la campagne *Soil Moisture Active Passive Validation Experiment in 2012* (SMAPVEX12). Les deux autres jeux de données proviennent de deux autres campagnes, à savoir celle du site forestier du Collège Mont-Ste-Anne et celle du site forestier près de la station SIRENE de l'Université de Sherbrooke. Ces deux campagnes se sont déroulées sur des sites forestiers proche du campus de l'Université de Sherbrooke, Québec, Canada. Tous les sites forestiers concernés par ces campagnes sont constitués majoritairement de feuillus, mais présentent des caractéristiques différentes en termes de densité des arbres, d'épaisseur de la couche de sol organique, de texture de sol minéral et de type de sous-bois. En plus des données collectées du sol minéral, du sol organique et du couvert végétal (arbres et sous-bois), des données de températures de brillance ont été acquises selon différentes configurations pour garantir une complémentarité des données entre les trois campagnes. Ces données ont permis de faire premièrement l'évaluation du modèle de Kurum *et al.* (2011). Deuxièmement, les observations et les résultats de simulation des trois campagnes ont été combinés pour caractériser, d'une part le comportement radiatif des couches des milieux forestiers étudiés. D'autre part, des conclusions par rapport aux perspectives d'estimation de l'humidité du sol sur des sites forestiers ont été formulées en faisant un lien avec les algorithmes d'estimation de l'humidité du sol des mission

satellites *Soil Moisture Active Passive* (SMAP) et *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS).

Des erreurs de simulations comprises dans l'intervalle [0,5 4,5] K ont été atteintes avec le modèle de Kurum *et al.* (2011). Ce modèle avait permis de caractériser les processus physiques qui se manifestent dans un milieu forestier avec toutes les couches qui le constituent, à savoir la couronne des arbres (branches et feuilles, les troncs), le sous-bois et les couches organiques qui recouvrent la couche de sol minéral.

Avec les mesures *in situ* faites sous la canopée du site forestier du collège Mont-Ste-Anne et les simulations, les contributions radiométriques des couches de litière et de sous-bois ont bien été quantifiées. Le sous-bois de ce site est composé majoritairement de feuilles (arbustes de frênes) et des petits arbres pour le cas des autres sites, est une source d'émission et d'extinction insignifiante en bande L. La couche de litière en conditions humides est une source d'émission, même avec des épaisseurs faibles.

Sur le site forestier proche de la station SIRENE de l'Université de Sherbrooke, les acquisitions de températures de brillance, faites au-dessus de la canopée forestière, et les simulations ont démontré que dans les conditions denses de ce site, les températures de brillances observées ou simulées sont insensibles à l'enlèvement de la couche de litière qui était humide. Dans ces conditions, les températures de brillance seraient insensibles aux variations de l'HS. Il en ressort que selon la densité du couvert végétal et les conditions d'observation, le signal émanant des couches basses (sol minéral, litière, et sous-bois) peut être drastiquement atténué. De là, le lien entre l'humidité du sol et le signal acquis par le radiomètre n'est plus exploitable pour l'estimation de l'humidité du sol sur des couverts forestiers denses.

Pour les trois sites forestiers d'étude, les simulations de la solution K1 du modèle de Kurum *et al.* (2011) donnent des erreurs de simulations plus petites par rapport à celles du modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0. La comparaison des simulations du modèle $\tau - \omega$ d'ordre 0 avec les solutions d'ordre 0 et d'ordre 1 de Kurum *et al.* (2011) permet d'expliquer le sens de l'albédo effectif utilisé par les missions satellitaires SMOS et SMAP.

Nos résultats montrent que la valeur d'albédo effectif utilisée par la mission SMAP est

faible pour nos couverts forestiers d'étude et est élevée pour le sous-bois du site forestier du collège Mont-Ste-Anne. Nos résultats montrent que la valeur d'albédo effectif est dépendante de la polarisation. Les valeurs calculées théoriquement de ce paramètre sont supérieures à celle utilisée par la mission SMAP pour les couverts forestiers. De même, la valeur du paramètre de rugosité h' adoptée est faible relativement aux valeurs estimées à partir des mesures faites sur les sols des sites forestiers du Collège Mont-Ste-Anne et près de la station SIRENE de l'Université de Sherbrooke.

7. Originalité et perspectives

Le projet de recherche entrepris a pour finalité la compréhension de l'interaction des températures de brillance en microondes passives bande L avec des milieux forestiers afin de dégager le potentiel de l'estimation de l'HS. Cette finalité a été atteinte en faisant appel au modèle de diffusion d'ordre 1 de Kurum *et al.* (2011).

L'intégration de la couche de sol organique (litière et/ou humus) dans le modèle de Kurum *et al.* (2011) à travers une approche plus simple de réflectivité trois-couches du sol forestier et la prise en compte de la couche de sous-bois constituent le premier aspect original des travaux réalisés. En effet, à travers le processus d'évaluation, nous avons démontré que nous arrivons à des erreurs de simulations qui sont dans la plage [0,5 4,5] K.

Le deuxième résultat original se rapporte au comportement radiatif de la couche de litière et des couches de sous-bois présentes dans nos sites d'étude. Nous avons mis en évidence la nature émissive de la couche de litière, en conditions humides et avec des épaisseurs faibles (~ 1 cm) et très peu émissive de la couche de sous-bois à travers l'approche expérimentale mise en place sur le site forestier du Collège Mont-Ste-Anne, et via aussi les simulations. À notre connaissance, cette étude expérimentale est la première en son genre à caractériser l'effet du sous-bois et de la litière en enlevant ces couches une après l'autre. Aussi, les simulations conduites avec les données du sous-bois des deux sites F2 et F3 de la campagne SMAPVEX12 et du site forestier proche de la station SIRENE de l'Université de Sherbrooke ont montré que la contribution en bande L du sous-bois est très faible.

Le troisième aspect original se dégage de la comparaison des simulations et des observations des campagnes de la région de Sherbrooke et de la campagne SMAPVEX12. Premièrement, l'enlèvement de la couche de litière sur le site proche de la station SIRENE n'a pas été accompagné d'altération des températures de brillance observées au-dessus de la canopée et simulées, en dépit d'une part des événements de précipitations survenues quelques heures avant son enlèvement et d'autre part de la conclusion tirée de la campagne du site forestier du Collège Mont-Ste-Anne. Deuxièmement, le sous-bois est une couche qui n'a pas d'impact sur les observations et les simulations. La conclusion à tirer dans nos conditions d'observations des différents sites forestiers étudiés, c'est que la couche des

arbres est majoritairement responsable de l'atténuation du signal venant des couches du sol (sol minéral et couches organiques).

Les travaux réalisés apportent une contribution par rapport aux valeurs de deux paramètres utilisées dans les algorithmes d'estimation de l'humidité du sol des missions satellitaires SMOS et SMAP. Il s'agit de l'albédo effectif ω^* du couvert végétal et du paramètre de rugosité effectif du sol h' . Pour le cas de sites forestiers étudiés, les valeurs de ω^* calculées par le modèle de Kurum *et al.* (2011) sont dépendantes de la polarisation. Elle sont comprises dans l'intervalle [0,050 0,085] en polarisation H et dans [0,070 0,090] en polarisation V. Ces valeurs sont supérieures à la valeur de 0,05 utilisée par la mission SMAP. Pour SMOS, les valeurs utilisées de ω^* pour les couverts forestiers sont dans l'intervalle [0,06 0,08]. Avec des données précises de couverts forestiers et du sol, l'utilisation du modèle de Kurum *et al.* (2011) peut fournir les valeurs de ω^* selon la biomasse nécessaire à la calibration du modèle $\tau - \omega$.

Dans une perspective d'amélioration de l'estimation de l'humidité du sol sur les couverts forestiers, il est opportun de simplifier le modèle de Kurum *et al.* (2011) de façon à pouvoir l'inverser. Par simplification, nous entendons étudier la possibilité de construire des relations entre les paramètres radiatifs d'épaisseur optique et d'albédo effectif, calculés théoriquement par le modèle de Kurum *et al.* (2011), et des paramètres physiques du couvert forestier. Ceux-ci doivent être facilement mesurables par télédétection tel que le LAI, la hauteur des arbres, etc. Pour faire cela, un jeu important de données doit être acquis sur différents sites forestiers présentant des caractéristiques variables telles que l'âge des arbres, la densité spatiale des troncs, la hauteur des arbres, etc. Le jeu de données du sol forestier et du couvert végétal doit être acquis avec précision, particulièrement tous les paramètres géométriques de la canopée forestière : dimensions (rayon et longueur), orientation angulaire, densité. Or, l'approche expérimentale utilisée pour la collecte de ces paramètres présente des sources d'erreurs et d'insuffisances. Précisément, un nombre limité de sites d'étude et de points de mesure, tels que ceux utilisés dans le cadre des travaux présentés dans ce document, constitue une insuffisance. Une autre insuffisance est liée à la brève fenêtre temporelle des mesures. Ces insuffisances ne permettent pas d'une part de répondre à certaines questions inhérentes aux tendances des données acquises, et

d'autre part de tirer des conclusions définitives quant au potentiel de l'estimation de l'humidité du sol sur des sites forestiers.

Sur un plan expérimental, il est très difficile de faire manuellement la mesure des paramètres requis sur tous les arbres observés par le radiomètre, d'où le recours au choix d'un arbre représentatif pour leur collecte, ce qui génère inévitablement des erreurs de modélisation. Dans le futur proche, ces données sur l'architecture 3-D (informations structurelles) de différents types de forêts, nécessaires à ce type de travail, pourront être disponibles avec le développement continu de la technologie Lidar, particulièrement le Lidar terrestre, et des algorithmes de traitement des données acquises (Fleck et Zande, 2004; Wang *et al.*, 2014; Xie *et al.*, 2018). Cela pourrait contribuer grandement aux efforts de modélisation multicouche de l'émission micro-onde dans les milieux forestiers.

8. Références bibliographiques

- Bircher, S., Balling, J. E., Skou, N. et Kerr, Y. H. (2012) Validation of SMOS brightness temperatures during the HOBE airborne campaign, western Denmark. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, n°5 PART 1, p. 1468-1482.
- Burke, W. J., Schmugge, T. et Paris, J. F. (1979) Comparison of 2.8- and 21-cm microwave radiometer observations over soils with emission model calculations, vol. 84, n°8, p. 287-294.
- Chan, S. K., Bindlish, R., O'Neill, P. E., Njoku, E., Jackson, T., Colliander, A., Chen, F., Burgin, M., Dunbar, S., Piepmeier, J., Yueh, S., Entekhabi, D., Cosh, M. H., Caldwell, T., Walker, J., Wu, X., Berg, A., Rowlandson, T., Pacheco, A., McNairn, H., Thibeault, M., Martinez-Fernandez, J., Gonzalez-Zamora, A., Seyfried, M., Bosch, D., Starks, P., Goodrich, D., Prueger, J., Palecki, M., Small, E. E., Zreda, M., Calvet, J. C., Crow, W. T. et Kerr, Y. (2016) Assessment of the SMAP Passive Soil Moisture Product. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, n°8, p. 4994-5007.
- Choudhury, B. J., Schmugge, T. J., Chang, a et Newton, R. W. (1979) Effect of surface roughness on the microwave emission from soils. *Journal of Geophysical Research*, vol. 84, n°C9, p. 5699.
- Choudhury, B. J., Schmugge, T. J. et Mo, T. (1982) Parameterization of Effective Soil Temperature for Microwave Emission. *Journal of Geophysical Research*, vol. 87, n°C2, p. 1301-1304.
- Chukhlanstev, A. A. (2006) *Microwave Radiometry of Vegetation Canopies*. (S.) Beniston Martin (Department of Geosciences, University of Fribourg, Dir.) (Advances i.). Springer.
- Della Vecchia, a., Ferrazzoli, P., Wigneron, J. P. et Grant, J. P. (2007) Modeling forest emissivity at L-band and a comparison with multitemporal measurements. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 4, n°4, p. 508-512.

Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Hallikainen, M. T. et El-Rayes, M. a. (1985) Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric Mixing Models. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-23, n°1.

England, A. W. (1975) Thermal Microwave Emission from a Scattering layer. Journal of Geophysical Research, vol. 80, p. 4484-4496.

Entekhabi, B. D., Njoku, E. G., Neill, P. E. O., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., Entin, J. K., Goodman, S. D., Jackson, T. J., Johnson, J., Kimball, J., Piepmeier, J. R., Koster, R. D., Martin, N., Mcdonald, K. C., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J. C., Spencer, M. W., Thurman, S. W., Tsang, L. et Zyl, J. Van (2010) TheSoilMoistureActivePassive (SMAP). IEEE Proceedings, vol. 98, n°5, p. 704-716.

Evaluation-of-remotely-sensed-and-modelled-soil-moisture-products-using-global-ground-based-in-situ-observations_2012_Remote-Sensing-of-Environment (s.d.).

Ferrazzoli, P. et Guerriero, L. (1996) Passive microwave remote sensing of forests: a model investigation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 34, n°2, p. 433-443.

Ferrazzoli, P. et Guerriero, L. (1996) Emissivity of vegetation: theory and computational aspects. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, vol. 10, n°5, p. 609-628.

Ferrazzoli, P., Guerriero, L. et Wigneron, J.-P. (2002) Simulating L-band emission of forests in view of future satellite applications. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, n°12, p. 2700-2708.

Ferrazzoli, Paolo, Guerriero, L. et Wigneron, J. P. (2002) Simulating L-band emission of forests in view of future satellite applications. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, n°12, p. 2700-2708.

Filali, B., Boone, F., Rhazi, J. et Ballivy, G. (2008) Design and Calibration of a Large Open-Ended Coaxial Probe for the Measurement of the Dielectric Properties of Concrete. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 56, n°10, p.

2322-2328.

- Fleck, S. et Zande, D. Van Der (2004) Reconstructions of tree structure from laser-scans and their use to predict physiological properties and processes in canopies. *International Archives of ...*, p. 119-123.
- Fung, A. K. et Fung, H. S. (1977) Application of First-Order Renormalization Method to Scattering from a Vegetation-Like Half-Space. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, vol. 15, n°4, p. 189-195.
- Gao, H., Wood, E., Drusch, M., Crow, W. et Jackson, T. (2004) Using a microwave emission model to estimate soil moisture from ESTAR observations during SGP99. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 5, p. 49-63.
- Gates, D. M. (1991) Water relations of forest trees. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 29, n°6, p. 836-842.
- Grant, J. P., van de Griend, a a, Schwank, M. et Wigneron, J.-P. (2009) Observations and Modeling of a Pine Forest Floor at L-Band. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, n°7, p. 2024-2034.
- Grant, J. P., Wigneron, J. P., Van de Griend, a. a., Kruszewski, a., Søbjaerg, S. S. et Skou, N. (2007) A field experiment on microwave forest radiometry: L-band signal behaviour for varying conditions of surface wetness. *Remote Sensing of Environment*, vol. 109, n°1, p. 10-19.
- Guglielmetti, M., Schwank, M., Mätzler, C., Oberdörster, C., Vanderborght, J. et Flüher, H. (2007) Measured microwave radiative transfer properties of a deciduous forest canopy. *Remote Sensing of Environment*, vol. 109, n°4, p. 523-532.
- Hakkila P. (1989) *Utilisation of Residual Forest Biomass*, Berlin Springer Series in Wood Science, Springer Verlag.

- He, L., Ivanov, V. Y., Bohrer, G., Maurer, K. D., Vogel, C. S. et Moghaddam, M. (2014) Effects of fine-scale soil moisture and canopy heterogeneity on energy and water fluxes in a northern temperate mixed forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 184, p. 243-256.
- Jackson, Thomas J.; Schmugge, T. (1991) Correction for the effects of vegetation on the microwave emission of soils.pdf. *IEEE Geoscience And Remote Sensing Symposium*.
- Jackson, T. J. (1993) Measuring surface soil moisture using passive microwave remote sensing. *Hydrological Processes*.
- Karam, M. a. (1997) A physical model for microwave radiometry of vegetation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, n°4, p. 1045-1058.
- Karam, M. A. (1994) The Potential Of Microwave Radiometers In Monitoring Forest Biomass. *IGARSS'94. 1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings.*, vol. 3, p. 1860-1862.
- Karam, M. a., Fung, A. K. et Antar, Y. M. (1988) Electromagnetic wave scattering from some vegetation samples. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 26, n°6, p. 799-808.
- Karam, M. a., Fung, A. K., Lang, R. H. et Chauhan, N. S. (1992) A microwave scattering model for layered vegetation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n°4, p. 767-784.
- Kurum, M., Lang, R. H., O'Neill, P. E., Joseph, A. T., Jackson, T. J. et Cosh, M. H. (2011) A first-order radiative transfer model for microwave radiometry of forest canopies at L-band. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, n°9, p. 3167-3179.
- Kurum, M., O'Neill, P. E., Lang, R. H., Cosh, M. H., Joseph, A. T. et Jackson, T. J. (2012) Impact of conifer forest litter on microwave emission at L-band. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, n°4, p. 1071-1084.

- Kurum, M., O'Neill, P. E., Lang, R. H., Joseph, A. T., Cosh, M. H. et Jackson, T. J. (2012) Effective tree scattering and opacity at L-band. *Remote Sensing of Environment*, vol. 118, n°2012, p. 1-9.
- Le Toan, T., Beaudoin, a., Riom, J. et Guyon, D. (1992) Relating forest biomass to SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n°2, p. 403-411.
- Le Vine, D. M. et Karam, M. a. (1996) Dependence of attenuation in a vegetation canopy on frequency and plant water content. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, n°5, p. 1090-1096.
- Le Vine, D. M., Schneider, a., Lang, R. H. et Carter, H. G. (1985) Scattering from thin dielectric disks, n°12, p. 1983-1986.
- Ledieu, J., Ridder, P. De, Clerck, P. De et Dautrebande, S. (1986) A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, vol. 88, n°3, p. 319-328.
- Lenoble, J., Herman, M., Deuzé, J. L., Lafrance, B., Santer, R. et Tanré, D. (2007) A successive order of scattering code for solving the vector equation of transfer in the earth's atmosphere with aerosols. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 107, n°3, p. 479-507.
- LeVine, D. M., Meneghini, R., Lang, R. H. et Seker, S. S. (1983) Scattering from arbitrarily oriented dielectric disks in the physical optics regime. *Journal of the Optical Society of America*, vol. 73, n°10, p. 1255-1262.
- Macelloni, G., Paloscia, S., Pampaloni, P. et Ruisi, R. (2001) Airborne multifrequency L- to Ka- band radiometric measurements over forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, n°11, p. 2507-2513.
- Martens, B., Lievens, H., Colliander, A., Member, S., Jackson, T. J. et Verhoest, N. E. C. (2015) Estimating Effective Roughness Parameters of the L-MEB Model for Soil Moisture Retrieval Using Passive Microwave Observations From SMAPVEX12, vol. 53, n°7, p. 4091-4103.

- Mavrovic, A., Roy, A., Royer, A., Filali, B., Boone, F., Pappas, C. et Sonnentag, O. (2018) Dielectric characterization of vegetation at L band using an open-ended coaxial probe. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, vol. 7, n°3, p. 195-208.
- Mcnairn, H., Jackson, T. J., Wiseman, G., Bélair, S., Berg, A., Bullock, P., Colliander, A., Member, Senior, Cosh, M. H., Kim, S., Magagi, R., Moghaddam, M., Njoku, E. G., Adams, J. R., Member, Student, Homayouni, S., Ojo, E. R. et Rowlandson, T. L. (2015) Prelaunch Calibration and Validation of the SMAP Soil Moisture Algorithms, vol. 53, n°5, p. 2784-2801.
- Mialon, A., Richaume, P., Leroux, D., Bircher, S., Bitar, A. Al, Pellarin, T., Wigneron, J. P. et Kerr, Y. H. (2015) Comparison of Dobson and Mironov dielectric models in the SMOS soil moisture retrieval algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, n°6, p. 3084-3094.
- Mironov, V., Kerr, Y., Wigneron, J. P., Kosolapova, L. et Demontoux, F. (2013) Temperature-and texture-dependent dielectric model for moist soils at 1.4 GHz. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 10, n°3, p. 419-423.
- Mironov, V. L. (2004) Spectral dielectric properties of moist soils in the microwave band. *IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 5, n°C, p. 3474-3477.
- Mironov, V. L., Dobson, M. C., Kaupp, V. H., Komarov, S. a. et Kleshchenko, V. N. (2004) Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, n°4, p. 773-785.
- Mironov, V. L., Kosolapova, L. G. et Fomin, S. V. (2009) Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, n°7, p. 2059-2070.
- Mo, T., Choudhury, B. J., Schmugge, T. J., Wang, J. R. et Jackson, T. J. (1982) A model for microwave emission from vegetation-covered fields. *Journal of Geophysical Research*, vol. 87, n°1, p. 11229-11237.

- Montpetit, B., Royer, A., Wigneron, J. P., Chanzy, A. et Mialon, A. (2015) Evaluation of multi-frequency bare soil microwave reflectivity models. *Remote Sensing of Environment*, vol. 162, p. 186-195.
- Njoku, E. G. et Entekhabi, D. (1996) Passive microwave remote sensing of soil moisture. *Journal of Hydrology*, vol. 184, n°1-2, p. 101-129.
- Njoku, E. G., Jackson, T. J., Lakshmi, V., Chan, T. K. et Nghiem, S. V. (2003) Soil moisture retrieval from AMSR-E. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, n°2 PART 1, p. 215-228.
- O'Neill, P., Lang, R., Kurum, M., Joseph, A., Cosh, M. et Jackson, T. (2008) Microwave soil moisture retrieval under trees. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 1, n°1, p. 37-40.
- Owe, M., De Jeu, R. et Walker, J. (2001) A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the microwave polarization difference index. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, n°8, p. 1643-1654.
- Pampaloni, P. (2004) Microwave radiometry of forests. *Waves in Random Media*, vol. 14, n°2, p. S275-S298.
- Peake W.H (1959) Interaction of electromagnetic waves with some natural surfaces. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 7, p. S324-S329.
- Pumpanen, J. et Ilvesniemi, H. (2005) Calibration of time domain reflectometry for forest soil humus layers. *Boreal Environment Research*, vol. 10, n°6, p. 589-595.
- Rahmoune, R., Ferrazzoli, P., Kerr, Y. H. et Richaume, P. (2013) SMOS level 2 retrieval algorithm over forests: Description and generation of global maps. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 6, n°3, p. 1430-1439.
- Redding, T. E., Hannam, K. D., Quideau, S. A. et Devito, K. J. (2005) Particle Density of Aspen, Spruce, and Pine Forest Floors in Alberta, Canada. *Soil Science Society of*

America Journal, vol. 69, n°5, p. 1503-1506.

Saleh, K., Wigneron, J. P., Waldteufel, P., de Rosnay, P., Schwank, M., Calvet, J. C. et Kerr, Y. H. (2007) Estimates of surface soil moisture under grass covers using L-band radiometry. *Remote Sensing of Environment*, vol. 109, n°1, p. 42-53.

Savva, Y., Szlavecz, K., Carlson, D., Gupchup, J., Szalay, A. et Terzis, A. (2013) Spatial patterns of soil moisture under forest and grass land cover in a suburban area, in Maryland, USA. *Geoderma*, vol. 192, n°1, p. 202-210.

Schaap, M. G., De Lange, L. et Heimovaara, T. J. (1997) TDR calibration of organic forest floor media. *Soil Technology*, vol. 11, n°2, p. 205-217.

Schmugge, T. (1985) Remote Sensing of Soil Moisture. *Hydrology Forecast*, n°3, p. 101-124.

Schmugge, T. J. et Choudhury, B. J. (1981) A comparison of radiative transfer models for predicting the microwave emission from soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 16, n°5, p. 927-938.

Schmugge, T. J., Wang, J. R. et Asrar, G. (1988) Results from the push broom microwave radiometer flights over the Konza Prairie in 1985. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 26, n°5, p. 590-596.

Schwank, M., Guglielmetti, M., Mälzler, C. et Flühler, H. (2008) Testing a new model for the L-band radiation of moist leaf litter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, n°7, p. 1982-1994.

Seker, S. et Schneider, a (1988) Electromagnetic scattering from a dielectric cylinder of finite length. *Antennas and Propagation, IEEE ...*, vol. 36, n°2, p. 303-307.

Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B. et Teuling, A. J. (2010) Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, vol. 99, n°3-4, p. 125-161.

- Shutko, Anatolij M; CHUKHLANTSEV, A. A. (1982) Microwave Radiation Peculiarities of Vegetative Covers. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 20, n°1, p. 27-29.
- Silva, T. a. M. et Dias, J. M. B. (1996) The effect of forest understory on synthetic aperture radar backscatter. IGARSS'97. 1997 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development, vol. 2, n°July 1995, p. 773-777.
- Srivastava, P. K., O'Neill, P., Cosh, M., Kurum, M., Lang, R. et Joseph, A. (2015) Evaluation of Dielectric Mixing Models for Passive Microwave Soil Moisture Retrieval Using Data from ComRAD Ground-Based SMAP Simulator. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 8, n°9, p. 4345-4354.
- Topp, G. C., Davis, J. L. et Annan, A. P. (1980) Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research, vol. 16, n°3, p. 574-582.
- Tsang, L., Njoku, E. et Kong, J. a. (1975) Microwave Thermal Emission From a Stratified Medium With Nonuniform Temperature Distribution. Journal of Applied Physics, vol. 46, n°12, p. 5127-5133.
- Ulaby, Fawwaz T, Moore, Richard K, F. A. K. (1986) Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Volume III, From theory to applications (ARTECH HOU.).
- Ulaby, F. et El-rayes, M. (1987) Microwave Dielectric Spectrum of Vegetation - Part II: Dual-Dispersion Model. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-25, n°5, p. 550-557.
- Ulaby, F. T. et Jedlicka, R. P. (1984) Microwave Dielectric Properties of Plant Materials. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-22, n°4, p. 406-415.
- ULABY, F. T., SARABANDI, K., McDONALD, K., WHITT, M. et DOBSON, M. C. (1990) Michigan microwave canopy scattering model. International Journal of

Remote Sensing, vol. 11, n°7, p. 1223-1253.

Wang, H., Magagi, R., Goita, K., Jagdhuber, T. et Hajnsek, I. (2016) Evaluation of simplified polarimetric decomposition for soil moisture retrieval over vegetated agricultural fields. Remote Sensing, vol. 8, n°2, p. 1-24.

Wang, J. R. et Choudhury, B. J. (1981) Remote sensing of soil moisture content, over bare field at 1.4 GHz frequency. Journal of Geophysical Research, vol. 86, n°C6, p. 5277-5282.

Wang, J. R., Oneill, P. E., Jackson, T. J. et Engman, E. T. (1983) Multifrequency Measurements of the Effects of Soil-Moisture, Soil Texture, and Surface-Roughness. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 21, n°1, p. 44-51.

Wang, J. R. et Schmugge, T. J. (1980) An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-18, n°4, p. 288-295.

Wang, Z., Zhang, L., Fang, T., Mathiopoulos, P. T., Qu, H., Chen, D. et Wang, Y. (2014) A structure-aware global optimization method for reconstructing 3-D tree models from terrestrial laser scanning data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 52, n°9, p. 5653-5669.

Wigneron, J.-P., Chanzy, A., Calvet, J.-C. et Bruguier, N. (1995) A simple algorithm to retrieve soil moisture and vegetation biomass using passive microwave measurements over crop fields. Remote Sensing of Environment, vol. 51, n°3, p. 331-341.

Wigneron, J.-P., Jackson, T. J., O'Neill, P., De Lannoy, G., Rosnay, P. de, Walker, J. P., Ferrazzoli, P., Mironov, V., Bircher, S., Grant, J. P., Kurum, M., Schwank, M., Munoz-Sabater, J., N. Das, A. R., Al-Yaari, A., Bitar, A. Al, Fernandez-Moran, R., Lawrence, H., Mialon, A., Parrens, M., Richaume, P., Rodriguez-Fernandez, N., Delwart, S. et Kerr, Y. (2017) Modelling the passive microwave signature from land surfaces: a review of recent results and application to the L-band SMOS & SMAP soil moisture retrieval algorithms. Remote Sensing of Environment, vol. 192, n°March, p.

238-262.

Wigneron, J.-P., Laguerre, L. et Kerr, Y. H. (2001) A simple parameterization of the L-band microwave emission from rough agricultural soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, n°8, p. 1697-1707.

Wigneron, J. P., Calvet, J. C., Pellarin, T., Van De Griend, A. A., Berger, M. et Ferrazzoli, P. (2003) Retrieving near-surface soil moisture from microwave radiometric observations: Current status and future plans. *Remote Sensing of Environment*, vol. 85, n°4, p. 489-506.

Wigneron, J. P., Kerr, Y., Waldteufel, P., Saleh, K., Escorihuela, M. J., Richaume, P., Ferrazzoli, P., de Rosnay, P., Gurney, R., Calvet, J. C., Grant, J. P., Guglielmetti, M., Hornbuckle, B., Mätzler, C., Pellarin, T. et Schwank, M. (2007) L-band Microwave Emission of the Biosphere (L-MEB) Model: Description and calibration against experimental data sets over crop fields. *Remote Sensing of Environment*, vol. 107, n°4, p. 639-655.

Wilheit, T. T. (1978) Radiative Transfer in a Plane Stratified Dielectric. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, vol. 16, n°2, p. 138-143.

Xie, D., Wang, X., Qi, J., Chen, Y., Mu, X., Zhang, W. et Yan, G. (2018) Reconstruction of single tree with leaves based on terrestrial LiDAR point cloud data. *Remote Sensing*, vol. 10, n°5.

9. Annexes: données de simulation des trois campagnes de mesures

Les abréviations T, B, S, L, suivies par un chiffre, font référence respectivement aux sous-groupes de diffuseurs des troncs, des branches, des tiges du sous-bois et des feuilles (sous-bois et arbres) considérés dans les simulations. Par exemple, dans le tableau 1, nous avons trois sous-groupes (S1, S2, S3) de diffuseurs (tiges) du sous-bois et trois sous-groupes (L1, L2, L3) pour les feuilles. Cette subdivision est faite sur la bases des dimensions (rayon et longueur) pour les tiges et sur la bases des deux rayons radiaux (radius1 et radius 2) mesurés des feuilles. Pour la même campagne (SF-MSA), comme les constantes diélectriques ont été estimées à partir des mesures gravimétriques faites les matinées et les après-midi sur les feuilles et les tiges du sous-bois, aucune valeur n'est précisée dans le tableau 1.

Tableau 1. Données de simulation de la campagne du site SF-MSA

		radius1 (cm)	radius2 (cm)	length (cm)	density (m ⁻³)	dielectric constants	angle (°)
Stalks Understory	S1	0,14		22,23	38,07	variable	{0 5}
	S2	0,25		33,78	47,58	variable	{0 5}
	S3	0,37		58,42	19,03	variable	{0 5}
Leaves	L1	2,78	4,79	0,012	902,52	variable	{0 90}
	L2	4,91	9,51	0,012	1151,17	variable	{0 90}
	L3	6,45	13,76	0,012	340,75	variable	{0 90}

Tableau 2. Données de simulation de la campagne du site SF-SIRENE

		radius (cm)	length (cm)	density (m ⁻³)	dielectric constants	Angle (°)
Trunks	T1	6,99	932,78	0,001	34,75+9,87*J	{0 5}
	T2	3,6	650,00	0,006	34,75+9,87*J	{0 5}
Branches	B1	0,22	16,62	20,800	8,93+3,20*J	{0 10}
	B2	0,69	71,59	1.273	8,93+3,20*J	{0 90}
	B3	1,12	97,00	0,385	8,93+3,20*J	{0 90}
	B4	1,41	71,82	0,151	8,93+3,20*J	{0 90}
	B5	2,05	131,93	0,117	8,93+3,20*J	{10 80}
Understory	S1	0,93	150,55	0,012	34,75+9,87*J	{45 80}
Leaves	L1	4,25	0,012	175,912	20,00+3.50*j	{0 60}

Tableau 3. Données de simulation de la campagne SMAPVEX12: Site F3

		radius (cm)	length (cm)	density (m ⁻³)	dielectric constants	angle (°)
Trunks	T1	14,40	790,00	0,008	29,5+6,0*J	{0 5}
	T2	5,01	610,80	0,006	29,5+6,0*J	{0 5}
	T3	3,00	686,50	0,004	29,5+6,0*J	{0 5}
Branches	B1	0,97	50,45	0,319	31+7,5*J	{30 90}
	B2	1,20	77,72	0,397	31+7,5*J	{25 45}
	B3	1,53	76,20	0,336	31+7,5*J	{20 60}
	B4	1,69	77,31	0,140	31+7,5*J	{40 80}
	B5	2,10	77,47	0,269	31+7,5*j	{30 50}
	B6	2,40	118,36	0,101	31+7,5*j	{35 85}
	B7	2,56	85,94	0,031	31+7,5*J	{45 65}
	B8	3,07	83,82	0,078	31+7,5*J	{45 50}
	B9	3,32	169,10	0,043	31+7,5*J	{40 90}
Understory	S1	1,28	436,41	0,004	31+7,5*J	{0 5}
Leaves	L1	4,25	0,012	116	20+3.5*j	{0 90}

Tableau 4. Données de simulation de la campagne SMAPVEX12: Site F2

		radius (cm)	length (cm)	density (m ⁻³)	dielectric constants	angle (°)
Trunks	T1	9,40	1179,50	0,008	27,5+5,5*J	{0 5}
	T2	5,01	610,80	0,006	27,5+5,5*J	{0 5}
	T3	1,82	461,50	0,004	27,5+5,5*J	{0 5}
Branches	B1	0,45	41,80	0,319	31+7,5*J	{30 90}
	B2	0,81	84,90	0,397	31+7,5*J	{10 85}
	B3	0,97	50,50	0,336	31+7,5*J	{30 90}
	B4	1,20	128,0	0,140	31+7,5*J	{45 60}
	B5	1,69	77,30	0,269	31+7,5*j	{40 80}
	B6	1,80	209,80	0,101	31+7,5*j	{20 70}
	B7	2,40	118,40	0,031	31+7,5*J	{35 85}
	B8	2,57	424,20	0,078	31+7,5*J	{50 60}
	B9	3,32	169,10	0,043	31+7,5*J	{40 90}
Understory	S1	1,25	170	0,001	31+7,5*J	{0 5}
Leaves	L1	4,25	0,012	23.78	20+3.5*j	{0 90}